



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non
automotive

Francesco Vellucci, Giovanni Pedè

SVILUPPO DI MODULI BATTERIE LITIO-IONI PER AVVIAMENTO E TRAZIONE NON
AUTOMOTIVE

Francesco Vellucci, Giovanni Pede (ENEA)

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

Sommario

1.	Inquadramento programmatico.....	6
2.	Premessa sul mercato mondiale e nazionale dell'elettrico.....	8
2.1	Mercato mondiale.....	8
2.2	Mercato nazionale.....	10
3.	Analisi bibliografica sullo stato dell'arte delle batterie litio-ioni.....	12
3.1	Caratteristiche e prestazioni delle batterie litio-ioni.....	12
3.2	Classificazione.....	13
3.2.1	Generalità.....	13
3.2.2	Materiali catodici.....	14
3.2.3	Materiali anodici.....	15
3.2.4	Elettrolita.....	15
3.3	Vantaggi e svantaggi derivanti dall'impiego di batterie al litio.....	16
3.4	Problematiche di sicurezza.....	18
4.	Analisi bibliografica sullo stato dell'arte del Battery Management System.....	19
4.1	Architettura di un sistema batterie: celle, moduli, sistema completo.....	19
4.2	Definizione e funzioni del Battery Management System.....	19
4.3	Funzione di protezione.....	20
4.4	Funzione di bilanciamento.....	23
4.5	Metodi di bilanciamento.....	24
4.6	Valutazione comparata di alcuni Battery Management Systems commerciali.....	29
4.6.1	BMS Tipo A.....	29
4.6.2	BMS Tipo B.....	34
4.6.3	BMS Tipo C.....	37
5.	Batterie litio-ioni per avviamento.....	39
6.	Batterie litio-ioni per applicazioni navali.....	41
7.	Generalità sulle batterie litio ioni per trazione.....	42
7.1	Batterie litio-ioni per la propulsione ibrida.....	42
7.2	Batteri litio-ioni per la propulsione elettrica pura.....	43
8.	Il mercato delle macchine "off-road".....	47
9.	Problematiche di progettazione modulo 12V per avviamento.....	50
10.	Problematiche di progettazione modulo 12 V per applicazioni navali.....	51
11.	Progettazione preliminare modulo 12V per trazione e relativo Battery Management System.....	52
11.1	Standards applicabili.....	52
11.2	Descrizione del modulo.....	52
11.3	Modi di esercizio.....	53
11.4	Requisiti funzionali ed elettrici.....	53

11.5	Requisiti di tipo meccanico	53
11.6	Requisiti per il sistema di raffreddamento.....	54
11.7	Vita	55
11.8	Condizioni ambientali.....	56
11.9	Scelta della cella elementare e caratteristiche elettriche principali del modulo di piccola taglia.....	56
11.10	Scelta della cella elementare e caratteristiche elettriche principali del modulo di media taglia.....	57
11.11	Scelta della cella elementare e caratteristiche elettriche principali del modulo di grande taglia.....	58
12.	Sistema d'accumulo modulare 48 V da laboratorio per mezzo fuoristrada da giardinaggio..	60
12.1	Generalità.....	60
12.2	Valutazione di alcuni sistemi commerciali 48V.....	61
12.2.1	Sistema 48 V – 100 Ah	62
12.2.2	Sistema 48 V – 20 Ah	80
12.3	Specifiche tecniche per il Battery Management System.	94
13.	Conclusioni	99
14.	Bibliografia	101
ALLEGATO 1 - CONFRONTO TRA BATTERIE DI CHIMICA DIVERSA		102
	Descrizione delle batterie e delle chimiche messe a confronto.	102
	Descrizione della procedura e delle apparecchiature adottate.	105
	Energia e potenza specifica, densità di energia e di potenza.	111
	Capacità a differenti regimi di scarica e temperature.	111
	Determinazione dell'energia	121
	Potenza.	125
	Determinazione delle resistenze interne	135
	Determinazione della tensione (OCV).....	140
	Autoscarica.....	142
	Confronto	145
ALLEGATO 2 - POSSIBILITÀ DI ESTENSIONE DELL'ELETTRIFICAZIONE AL MERCATO DEI VEICOLI OFF-ROAD		149
	Introduzione	149
	Razionale di carattere energetico-ambientale a favore della trazione elettrica.....	150
	Metodologia adottata.....	151
	Stato dell'arte: schede tecniche di alcuni mezzi elettrici sul mercato.....	152
	Settori merceologici considerati.....	154
	Prospetto della proposta di elettrificazione	159
	Studio del mercato potenziale	162

Problemi rilevati dal confronto con l'industria	164
Conclusioni	166
ALLEGATO A: aziende italiane considerate nel ns. studio	167
Ringraziamenti	175

Glossario

BMCU	unità di gestione e controllo della batteria
BMS	sistema di gestione e controllo batteria
CC	corrente costante
CCA	cold cranking amperes
CV	tensione costante
DAQ	sistema di acquisizione dati
DOD	profondità di scarica
LCO	litio cobalto
LFP	litio ferro fosfato
LMO	litio manganese
LMU	unità di monitoraggio locale
LTO	titanato di litio
NCA	nichel cobalto alluminio
NCM	nichel cobalto manganese
OCV	tensione a circuito aperto
PCBA	scheda elettronica (printed circuit board assembly)
PWM	modulazione d'ampiezza
RPP	potenza di picco rigenerativa
RX	ricevente
SEI	interfaccia solido elettrolita
SLI	starting lighting ignition
SOC	stato di carica
SOH	stato di salute
TX	trasmittente

1. 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)

2. Premessa sul mercato mondiale e nazionale dell'elettrico.

2.1 Mercato mondiale

L'elettrificazione dei trasporti contribuisce alla riduzione delle emissioni di CO₂. Uno scenario di previsione elaborato dalla IEA (International Energy Agency) nel 2010 fissa per il 2050 l'obiettivo di una riduzione complessiva del 50% delle emissioni di CO₂ rispetto ai livelli del 2005, di cui il 30% sarà ottenuto con il contributo dei soli trasporti. Questa riduzione sarà raggiunta tramite la vendita annuale di circa 50 milioni di veicoli elettrici light-duty e 50 milioni di veicoli ibridi plug-in per l'anno 2050 [1].

Il raggiungimento di tali obiettivi richiede che le tecnologie dei veicoli elettrici ed ibridi plug-in evolvano rapidamente nel tempo, con alti tassi di penetrazione del mercato appena inizierà la diffusione di tali tipologie di veicoli (vedere figura seguente).

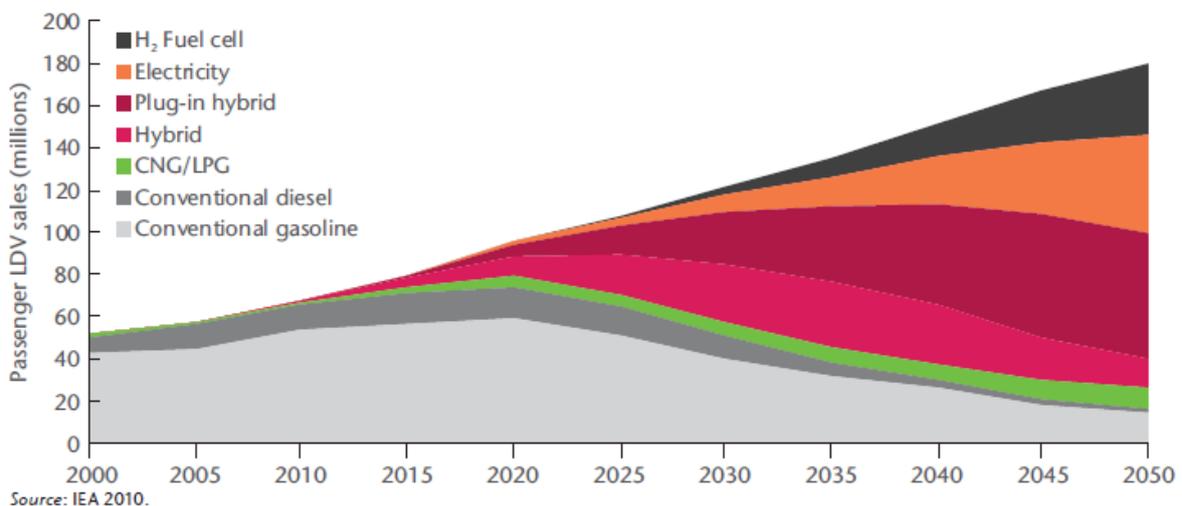


Figura 1 - Vendite annuali di veicoli light duty per tipo di tecnologia

I veicoli elettrici ed ibridi plug-in sono attesi iniziare a penetrare il mercato subito dopo il 2010, con il raggiungimento della vendita di 2,5 milioni di veicoli elettrici e circa 5 milioni di veicoli ibridi plug-in per l'anno 2020 (vedere figure seguenti e tabella).

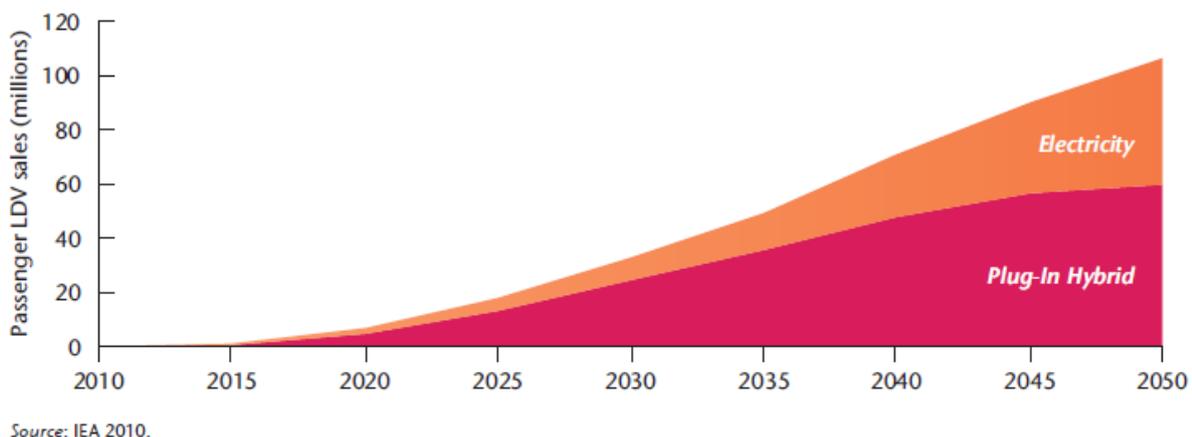
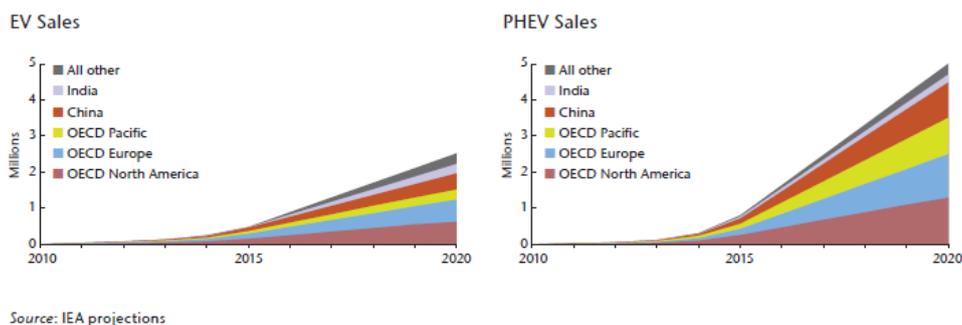


Figura 2 - Vendite annuali globali di veicoli elettrici ed ibridi plug-in.



Source: IEA projections

Figura 3 - Vendite totali di veicoli elettrici ed ibridi per regione fino al 2020.

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PHEV	0.0	0.7	4.9	13.1	24.6	35.6	47.7	56.3	59.7
EV	0.0	0.3	2.0	4.5	8.7	13.9	23.2	33.9	46.6
Total	0.0	1.1	6.9	17.7	33.3	49.5	70.9	90.2	106.4

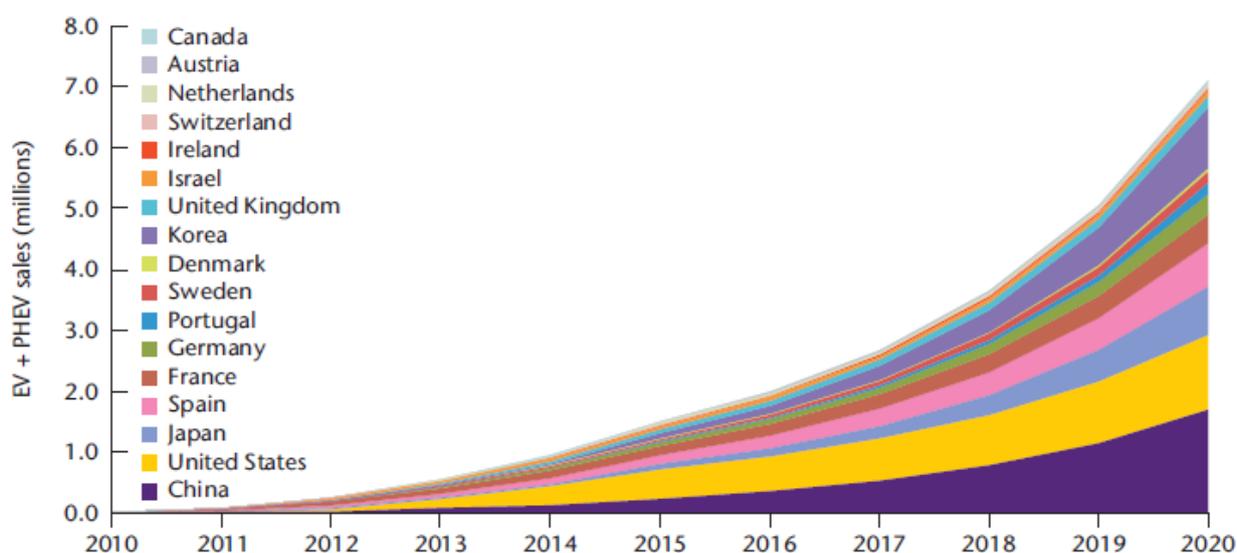
Source: IEA 2010.

Tabella 1 - Vendite globali di veicoli elettrici ed ibridi plug-in (milioni per anno)

Per il 2030, le vendite di veicoli elettrici sono proiettate a raggiungere 9 milioni e quelle di veicoli ibridi plug-in circa 25 milioni. Dopo il 2040, le vendite di veicoli ibridi plug-in sono attese iniziare a declinare, mentre i veicoli elettrici conquisteranno più ampi settori di mercato. L'obiettivo finale è raggiungere 50 milioni di vendite annuali per entrambi i tipi di veicolo per il 2050.

Questo è uno scenario ambizioso ma plausibile, che richiede politiche forti, includendo infrastrutture ed incentivi.

Anche se la stima di crescita delle vendite di veicoli elettrici ed ibridi plug-in è estremamente ambiziosa, una revisione degli obiettivi recentemente annunciati dai Governi nel mondo conduce per il 2020 ad un tasso di crescita simile (vedere figura).



Source: IEA data.

Figura 4 - Obiettivi di vendite nazionali di veicoli elettrici ed ibridi plug-in se gli obiettivi dei tassi di crescita nazionali annuali sono rispettati.

La maggior parte di tali annunci è stata fatta negli ultimi 12 mesi, dimostrando l'alta priorità che lo sviluppo e la diffusione dei veicoli elettrici ed ibridi plug-in ha a livello internazionale. Se tutti gli obiettivi annunciati fossero raggiunti, circa 1,5 milioni di veicoli elettrici ed ibridi plug-in sarebbero venduti per il 2015 e quasi 7 milioni per il 2020. Questi dati non sono lontani da quelli delle figure precedenti.

2.2 Mercato nazionale

Con riferimento ai veicoli ibridi ed elettrici venduti in Italia, la situazione è illustrata nella figura seguente [2].

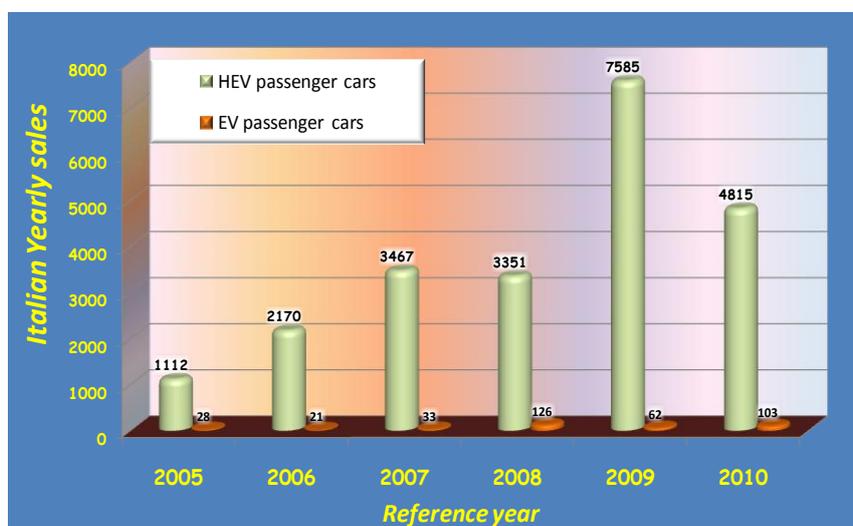


Figura 5 – Vendite annuali in Italia

Secondo una stima CIVES (vedere figura successiva), il numero totale dei veicoli elettrici ed ibridi (incluse biciclette a pedalata assistita) in Italia ammonta nel 2009 a 247.000 unità.

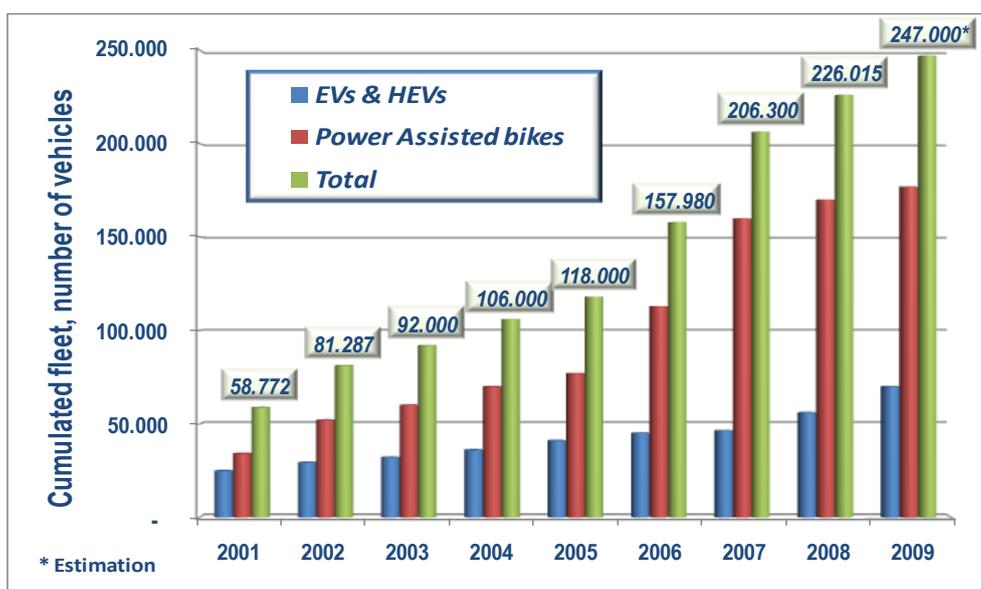


Figura 6 – Totali di vendite annuali in Italia

La figura che segue riporta una ripartizione del totale per tipologia di veicolo, sempre da stima CIVES.

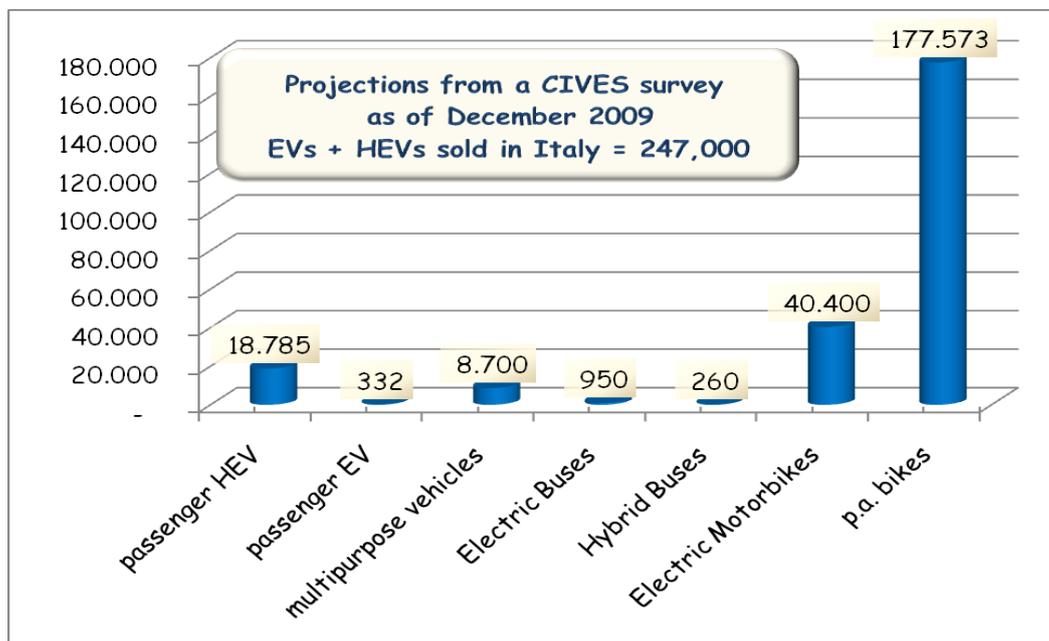


Figura 7 – Totali di vendite annuali in Italia, ripartizione per categorie

La figura che segue illustra la distribuzione delle infrastrutture di ricarica e mostra la diffusione ancora non capillare delle stesse.



Figura 8 – Distribuzione delle infrastrutture di ricarica in Italia

Complessivamente si rileva una situazione positiva, anche tenendo conto della crisi economica: la ricerca è ben diretta verso l'obiettivo dell'elettrificazione dei trasporti, è aumentato il pubblico consenso, è positivo il ruolo delle autorità locali (regioni e municipalità), leggi ed iniziative promozionali sono buoni segnali, anche se non è ancora stata attuata una strategia centrale governativa. Va incoraggiata la creazione di strutture di ricarica.

3. Analisi bibliografica sullo stato dell'arte delle batterie litio-ioni.

Le batterie al litio vengono solitamente distinte in due categorie principali [3]:

- batterie al litio metallico,
- batterie litio-ione.

Nella prima tipologia, l'anodo è litio metallico, mentre l'elettrolita può essere sia liquido che solido, sotto forma di materiali ceramici, vetrosi o polimerici.

Nella seconda tipologia, detta appunto litio-ione, vengono usati materiali elettrodici "ad intercalazione", che possono accumulare e rilasciare elevate quantità di ioni di litio in maniera reversibile. Nelle batterie litio-ione tradizionali, l'elettrolita è un liquido che impregna una matrice solida polimerica inerte, avente la funzione di separatore. L'elettrolita può anche essere un gelificato in una matrice polimerica oppure solido, costituito da una matrice polimerica che in questo caso, a differenza dei precedenti, oltre alla funzione di separatore svolge quella di elettrolita. Le batterie con elettrolita gelificato o solido prendono il nome di batterie litio-ione polimeriche e pertanto si caratterizzano come sottoinsieme delle batterie litio-ione: quelle con elettrolita gelificato sono molto simili alle batterie litio-ione tradizionali ed hanno le stesse prestazioni e gli stessi problemi di quelle tradizionali, quelle con elettrolita solido hanno un livello di sicurezza molto maggiore.

La soluzione anodica delle batterie al litio metallico garantisce a queste ultime notevoli vantaggi in termini di bassa resistenza interna, elevata capacità e, conseguentemente, elevata potenza ed energia specifica ma, a causa dell'estrema reattività del litio metallico, ha posto alcuni problemi di sicurezza che ne hanno impedito la diffusione commerciale. L'anodo delle batterie litio-ione ha prestazioni inferiori a quello delle batterie al litio metallico ma, essendo meno reattivo, offre maggiore stabilità e sicurezza d'uso. Nel proseguimento di questo elaborato, si farà riferimento esclusivamente alle batterie litio-ione.

Il presente capitolo tratta le tecnologie delle batterie litio-ione più diffusamente impiegate o in via di sviluppo nel campo dei veicoli elettrici ed ibridi: viene presentata una descrizione generale, seguita da una rassegna delle tipologie esistenti.

3.1 Caratteristiche e prestazioni delle batterie litio-ioni.

L'accumulatore al litio è l'ultima e più promettente generazione di accumulatori per le applicazioni più diverse, in particolare quelle dei veicoli elettrici. Infatti, il litio è un metallo alcalino, terzo elemento della scala periodica, con modesto peso atomico, una notevole reattività ed il potenziale elettrochimico più negativo rispetto all'elettrodo standard ad idrogeno: le batterie con tecnologia al litio hanno conseguentemente alta tensione e densità di potenza ed energia, che le rendono notevolmente vantaggiose rispetto a quelle di altre tecnologie, come evidenzia la Figura 9, e particolarmente adatte all'uso nei veicoli elettrici ed ibridi. Con i materiali elettrodici attualmente usati, l'intervallo della tensione di esercizio delle batterie è approssimativamente da 2,7 a 4,2 V; la tensione di scarica (media) nominale è circa 3,6 V e la maggior parte della capacità utile viene resa tra 4,0 e 3,5 V.

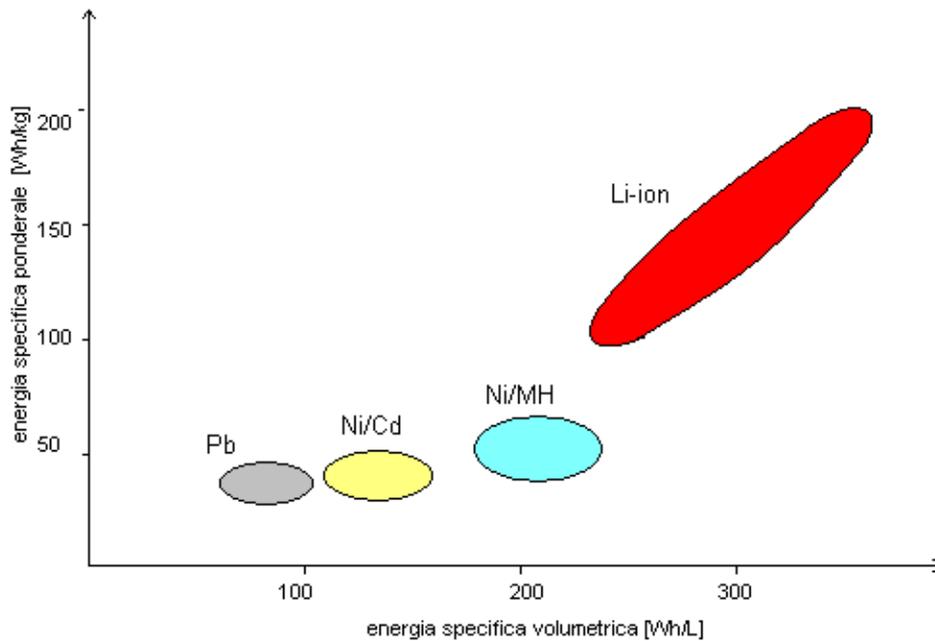


Figura 9 – Prestazioni di batterie di varie tecnologie.

Il meccanismo di funzionamento delle batterie al litio-ione si basa sulla migrazione di ioni di litio che vengono ciclicamente estratti da e introdotti in una matrice ospite (il cosiddetto "elettrodo ad intercalazione") durante i processi di carica e scarica. Parallelamente alla migrazione degli ioni avviene la riduzione/ossidazione della matrice ospite, che provoca il flusso esterno di elettroni (Figura 10).

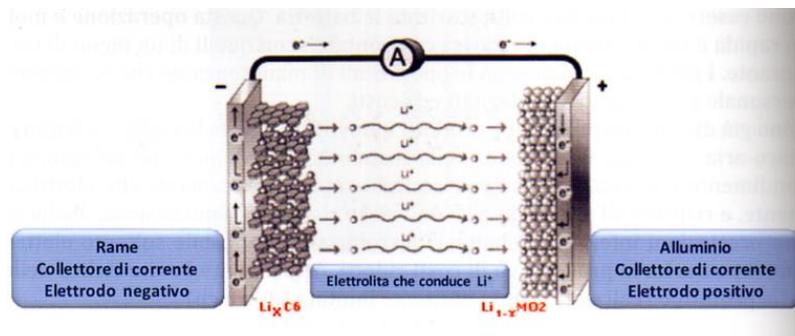


Figura 10 – Schema di funzionamento di una batteria litio-ione in scarica.

3.2 Classificazione.

3.2.1 Generalità.

Le batterie al litio utilizzano una varietà di materiali elettrodici ed elettrolitici, dando vita ad un elevato numero di coppie elettrochimiche, e conseguentemente ad una classe di prodotti "al litio", oggi commercialmente disponibili od in fase di avanzata ricerca e sviluppo. La scelta dei materiali anodici e catodici e dell'elettrolita determina la tensione di lavoro ed ha effetto sull'energia specifica della singola cella: la maggior parte delle celle a litio supera facilmente i 3 V di tensione a vuoto.

3.2.2 Materiali catodici.

Attualmente i materiali più promettenti per la costruzione del catodo (elettrodo positivo) sono ossidi di Mn, Ni, Co, i quali presentano una struttura cristallina piuttosto aperta con canali e spazi all' interno dei quali si inseriscono facilmente gli ioni di litio, ma presentano minore affidabilità e sicurezza rispetto al Ferro Fosfato.

La tecnologia delle batterie al litio è ancora in fase di sviluppo: le ricerche si sono focalizzate principalmente sullo sviluppo di materiali catodici. I materiali catodici tipicamente hanno capacità di accumulare carica (in forma di litio), per unità di massa e di volume, che è significativamente inferiore a quella dei materiali disponibili per formare l'elettrodo positivo. Quindi i maggiori miglioramenti di prestazioni, in termini di più grandi densità di energia e di potenza, devono essere ottenuti dallo sviluppo dei materiali catodici.

Diossido di Cobalto

Il diossido di cobalto - LiCoO_2 - è stato il materiale catodico più ampiamente usato per molti anni. Esso ha buona capacità di accumulare gli ioni litio, buona reversibilità elettrochimica, fornisce una densità di energia ed un numero di cicli moderati. Ha adeguata stabilità chimica ed una buona stabilità termica, anche se è meno termicamente stabile rispetto ad altri ossidi metallici o al fosfato e ciò lo rende altamente combustibile in caso di estreme condizioni d'abuso: la penetrazione di una cella o valori di corrente troppo alti, possono generare un aumento incontrollato di temperatura o anche l'incendio. Inoltre è relativamente più costoso per kWh di energia accumulata rispetto ad altri ossidi. Queste caratteristiche lo rendono non attraente per l'uso nei veicoli elettrici ed ibridi.

Ferro Fosfato

La tecnologia basata sul ferro fosfato - LiFePO_4 - denominato LFP, possiede una elevata stabilità termica e chimica che fornisce caratteristiche di maggior sicurezza rispetto alle altre tecnologie litio-ione. Le celle ferro fosfato sono incombustibili nell'eventualità di errori di gestione durante la carica o scarica, sono più stabili in condizioni di sovraccarica o di corto circuito e possono resistere ad alte temperature. Quando avviene un abuso, il materiale catodico a base di fosfato non rilascia ossigeno, non brucia ed è molto meno suscettibile ad un aumento incontrollato della temperatura.

Le celle ferro fosfato hanno una densità di energia inferiore a quelle al cobalto. In compenso possono sopportare più alte correnti e quindi più alte potenze, offrono una vita più lunga e costituiscono un significativo miglioramento in termini di costo, sicurezza e tossicità.

Ossido di Manganese Spinello

L'ossido di manganese (LiMn_2O_4 o, più propriamente, $\text{Li}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$), denominato LMO, ha struttura a spinello. Rispetto alle chimiche basate sul cobalto è termicamente e chimicamente più stabile, in virtù della stabilità intrinseca della sua struttura cristallina, ed anche la potenza è superiore, grazie alla migliorata capacità d'inserzione dello ione litio nella struttura. Invece la densità di energia e la ciclabilità sono inferiori. Il Manganese, a differenza del cobalto, è un materiale catodico sicuro e rispettoso dell'ambiente. Altri benefici includono costi più bassi, che renderanno l'LMO attraente se avranno successo gli sforzi per stabilizzare il materiale contro la dissoluzione elettrochimica del manganese nell'elettrolita.

Ossido di Nichel

L'ossido di nichel (LiNiO_2) ha una capacità specifica ed un potenziale molto più alti rispetto al cobalto, ma ha molti problemi di sicurezza ed è molto meno stabile.

Per ottenere un compromesso di prestazioni, costo e sicurezza, può essere stabilizzato con aggiunta di cobalto ed alluminio, formando il composto LiNiCoAlO_2 , chiamato NCA, oppure cobalto e manganese, formando il composto $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$, sufficientemente stabili per essere usati negli accumulatori.

Complessivamente la capacità e la densità di energia sono superiori a quelle del LiFePO_4 e del LiCoO_2 . In termini di densità di potenza le prestazioni elettrochimiche sono migliori di quelle del LiCoO_2 , ma non sono così alte come quelle del LiFePO_4 .

3.2.3 Materiali anodici.

Grafite

Per l'anodo (elettrodo negativo) è molto utilizzata la grafite. La grafite presenta una struttura a strati, con piani di atomi disposti in strutture esagonali fortemente legati tra loro, mentre i vari piani sono tenuti assieme da legami deboli. Dal momento che gli ioni di Litio si legano più debolmente alla grafite che agli ossidi metallici, il loro spostamento verso il catodo durante la scarica è energeticamente favorito. Durante la carica questa tendenza è invertita.

Titanato di litio

Anodi al titanato di litio sono recentemente divenuti commercialmente disponibili. In questo tipo di anodo, si sostituisce la grafite con il titanato di litio. Questo anodo è compatibile con tutte le tipologie di catodo suddette, ma è generalmente usato in congiunzione con materiali a base di manganese. Il titanato di litio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), denominato LTO, offre potenza elevata combinata con un ampio range delle temperature di esercizio dovuto ad una grande stabilità termica, ed è considerato un'alternativa più sicura all'anodo in grafite. Si aggiunge una notevolissima ciclabilità ed accelerati tempi di ricarica. Questo è in gran parte dovuto alla struttura del materiale ed alla sua quasi nulla deformazione durante il ciclaggio, che si traduce in una lunghissima vita dell'accumulatore rispetto alle batterie di altre tecnologie. Nessuna interazione indesiderata avviene con l'elettrolita: questo consente alla batteria di essere caricata molto rapidamente, senza il rischio di corto circuiti o fuga termica.

D'altro verso, l'energia delle batterie con anodo litio titanato risulta essere leggermente inferiore rispetto a quella delle batterie con anodo basato sulla grafite.

3.2.4 Elettrolita.

Elettrolita in soluzione liquida

L'elettrolita è usualmente una soluzione di sale di litio (solitamente LiPF_6) dissolto in un solvente organico non acquoso, capace di sciogliere il sale di litio e trasportare corrente mediante ioni di litio. I separatori sono usualmente membrane microporose fatte di polietilene o polipropilene. A causa della bassa conducibilità degli elettroliti organici, un'adeguata potenza della cella o della batteria può essere ottenuta solamente con elettrodi e separatori che sono molto più sottili di quelli usati nelle batterie con elettroliti acquosi. La necessità di elettrodi sottili ha determinato che l'avvolgimento a spirale dell'elettrodo positivo, il separatore e l'elettrodo negativo è divenuto il metodo preferito per la fabbricazione delle celle ioni litio, ma

stanno ora ricevendo consensi configurazioni di cella piatta impacchettata in involucri in plastica (spesso metallizzata).

Elettrolita polimerico

Le batterie al litio polimero si differenziano da quelle convenzionali nel tipo di elettrolita usato. Il progetto originale usava un elettrolita polimerico solido secco. Questo elettrolita somiglia ad un film plastico che non conduce l'elettricità ma consente lo scambio ionico. L'elettrolita polimerico sostituisce il tradizionale separatore poroso, che è imbevuto con l'elettrolita. Il progetto del polimero secco offre semplificazioni a riguardo della costruzione, robustezza, sicurezza e geometria con spessore sottile. Sfortunatamente, il polimero secco garantisce bassa conducibilità. La resistenza interna è troppo alta e non è possibile consegnare le alte correnti richieste dalle moderne applicazioni. Per compromesso, sono stati aggiunti alcuni elettroliti gelificati. Le celle commerciali usano un separatore/elettrolita a membrana preparato dallo stesso polietilene poroso tradizionale o separatore polipropilenico riempito con un polimero, che gelifica sostituendo l'elettrolita liquido. Così le celle commerciali al litio-ione polimero sono molto simili nella chimica e nei materiali alle loro controparti con elettrolita liquido e rispetto ad esse presentano i vantaggi di avere un profilo molto basso, fattore di forma flessibile (i costruttori non sono vincolati da formati di cella standard), leggerezza (l'elettrolita gelificato semplifica il packaging), sicurezza (maggiore resistenza alla sovraccarica, minori possibilità di perdita di elettrolita). Nonostante tali vantaggi, la tecnologia litio-ione polimero non si è diffusa tanto velocemente come era nelle attese. Infatti, la sua superiorità rispetto agli altri sistemi e i bassi costi di fabbricazione non sono stati pienamente realizzati: rispetto alla tecnologia litio-ione tradizionali, la capacità è lievemente inferiore e permane un alto rapporto costo – energia.

3.3 Vantaggi e svantaggi derivanti dall'impiego di batterie al litio.

Vantaggi.

- Alta tensione di cella, fino a 3,7 V nominali, diretta conseguenza del potenziale altamente negativo del litio. Ciò significa che, per una data tensione di batteria, sono necessarie un minor numero di celle ed associate connessioni ed elettronica per sistemi batterie ad alta tensione (una cella al litio può sostituire tre celle al NiCd o NiMH, che hanno una tensione di soli 1,2 V).
- Basso peso.
- Densità di energia molto alta (circa quattro volte meglio delle piombo acido), come conseguenza dell'alta tensione di cella, e densità di potenza molto alta. L'alta densità di potenza ed energia sono una conseguenza dell'esiguo spessore delle celle.
- La piccola dimensione consente l'intercalazione elettrochimica reversibile degli atomi di litio negli elettrodi negativi a base di carbonio, con piccolo sforzo e stress strutturale. Analogamente, le dimensioni molto piccole dello ione litio rendono quest'ultimo facilmente e reversibilmente incorporabile in una varietà di ossidi che formano l'elettrodo positivo. Queste caratteristiche mantengono l'integrità degli elettrodi durante i cicli di carica – scarica, requisito chiave per i cicli vita, specialmente quelli con scarica profonda: le batterie possono essere ciclizzate con intensi DOD senza influenzare negativamente il ciclo vita o l'abilità a fornire alta potenza di uscita.

- Possibilità di ottimizzazione per applicazioni che richiedono energia o potenza. Le celle per batterie al litio si dividono in celle per applicazioni di energia e celle per applicazioni di potenza: queste ultime hanno un rapporto superficie/volume più grande delle precedenti in modo da dissipare il maggiore calore prodotto.
- Possibilità di scarica ad un alto rate di corrente (attualmente sono disponibili sul mercato batterie che consentono scariche fino a 40 volte il valore della corrente nominale). L'alto rate di scarica significa che per l'uso automotive la potenza richiesta per l'avviamento a freddo o la potenza di spinta per veicoli ibridi può essere fornita da una batteria di capacità inferiore.
- Possibilità di ricarica rapida.
- Autoscarica molto bassa (3 ÷ 5% al mese), circa la metà rispetto alle batterie al nickel.
- Efficienza coulombiana (rapporto tra capacità in scarica e capacità in carica) molto alta, pari quasi al 100%: quindi si perde molta poca capacità durante il ciclaggio carica – scarica.
- Alta efficienza energetica.
- No effetto memoria.
- Bassa manutenzione.
- Possibilità di esecuzione di micro cicli.
- Lunga vita. Il ciclo vita può essere significativamente esteso usando circuiti di protezione per limitare i possibili DOD della batteria. Ciò compensa gli alti costi iniziali della batteria.
- Disponibilità di un ampio intervallo di valori di capacità (da 50 mAh fino a 1000 Ah) e di un ampio numero di produttori.

Svantaggi

- E' necessario un circuito elettronico di protezione per mantenere tensione e corrente nei limiti di sicurezza in quanto le batterie al litio non tollerano la sovraccarica e la sovrascarica.
- E' necessaria una gestione termica per mantenere la temperatura nel campo di valori definiti dal costruttore ed evitare la deriva termica. La temperatura influenza notevolmente sicurezza, prestazioni e vita delle batterie. Quindi è essenziale una gestione termica per raggiungere le desiderate prestazioni e vita, specialmente nel caso di grandi pacchi batterie e sistemi. In un veicolo elettrico, è possibile che le batterie debbano essere scaldate durante l'esercizio a freddo e raffreddate durante l'esercizio a caldo.
- Le batterie sono soggette ad invecchiamento, anche se non in uso (il mantenimento in un luogo fresco al 40% di carica riduce l'effetto di invecchiamento).
- La sovraccarica può danneggiare le batterie ed originare condizioni rischiose, includendo la perdita di gas ed il rilascio di vapori infiammabili del solvente elettrolitico. Per evitare la sovraccarica, le batterie agli ioni di litio richiedono accurato controllo della tensione di ogni singola cella. L'accurato ed affidabile controllo della tensione di cella e temperatura è quindi un requisito essenziale per la lunga vita e la sicurezza delle batterie litio-ioni per tutti gli usi, ma in particolare per applicazioni auto motive.
- Restrizioni nei trasporti: le spedizioni di grandi quantità di batterie sono soggette a normativa.

- Il costo corrente delle batterie litio-ioni per veicoli elettrici è circa 450 \$/kWh. Se i progetti correnti determineranno gli attesi volumi di produzione, si prevede una diminuzione del costo a circa 200 – 300 \$/kWh.
- La tecnologia delle batterie al litio non è pienamente matura: metalli e chimiche cambiano su base continua.

3.4 Problematiche di sicurezza.

Le celle di batteria hanno dei campi di funzionamento in tensione molto rigidi: il superamento dei limiti di tensione può portare ad un danneggiamento irreversibile delle celle, oltre ad un aumento della temperatura che ne può causare l'incendio e l'esplosione. L'esercizio di tali batterie richiede pertanto un controllo continuo dello stato delle singole celle: nei sistemi batterie, composti usualmente da un elevato numero di celle, tale funzione è assicurata da appositi dispositivi elettronici chiamati BMS (Battery Management System). Nei sistemi batterie il BMS svolge anche una funzione di ottimizzazione delle prestazioni, come sarà mostrato più avanti.

Per i suddetti motivi, le batterie al litio presentano problematiche di sicurezza anche a livello di trasporto, difatti "le celle e le batterie al litio sono elencate nella lista dei materiali pericolosi in base alle raccomandazioni delle Nazioni Unite sul trasporto delle merci pericolose" e sono classificate secondo la:

- Classe UN n.: 3480
- Classificazione di pericolosità: 9
- Imballaggio: gruppo II

e risultano soggette alle seguenti regolamentazioni internazionali:

- Trasporto aereo internazionale: IATA
- Trasporto marittimo internazionale: IMDG
- Trasporto stradale europeo: ADR
- Trasporto ferroviario europeo: RID

4. Analisi bibliografica sullo stato dell'arte del Battery Management System.

4.1 Architettura di un sistema batterie: celle, moduli, sistema completo.

Si intende per cella l'unità elementare di cui si compone ogni sistema batterie.

Il modulo è un insieme di celle, che possono essere variamente connesse in serie e/o parallelo, racchiuse all'interno di un involucro, dotato eventualmente di circuiteria per il controllo dei parametri elettrici e termici.

Il sistema completo, denominato anche sistema batterie o pacco batterie, è l'insieme di più moduli, variamente connessi in serie e/o parallelo, generalmente dotato di un sistema elettronico per il controllo dei parametri elettrici e termici ad un livello gerarchico a quello (se presente) dei moduli.

4.2 Definizione e funzioni del Battery Management System.

Il BMS (Battery Management System) è un sistema elettronico di monitoraggio e gestione delle batterie: esso mantiene un controllo sui parametri fondamentali di esercizio, come tensioni, correnti e temperature, durante le fasi di carica e scarica. In caso di allarme, quando uno qualsiasi dei parametri raggiunge un valore fuori dai limiti consentiti, il circuito elettronico di controllo fornisce gli input ai dispositivi di protezione per scollegare la batteria dal carico o dal caricabatterie. Il BMS comprende non solo il monitoraggio e la protezione del sistema batterie, ma anche metodi per ottimizzarne le prestazioni e prolungare la vita delle celle.

Le prestazioni di un veicolo ibrido dipendono in maniera sostanziale dallo "stato di salute" in cui si trovano le batterie: se non trattate opportunamente, la loro capacità di accumulare energia e la vita in cicli di carica/scarica si possono ridurre notevolmente richiedendone una prematura sostituzione.

I principali fattori di rischio per le batterie, di qualunque tipo esse siano, sono la sovraccarica o la scarica troppo profonda. Il primo fattore può portare alla distruzione della batteria, mentre il secondo può condurre ad una riduzione permanente della capacità massima immagazzinabile. Il controllo dello stato di carica delle batterie (SOC) è quindi indispensabile oltre che per la scelta delle politiche di gestione del veicolo, per assicurare un corretto utilizzo degli accumulatori. In un veicolo elettrico o ibrido le batterie sono connesse in serie per poter disporre di una tensione di pacco sufficientemente elevata (fino a qualche centinaio di volt). Il controllo dello stato di carica deve essere effettuato per ogni singola cella del pacco. Infatti, inevitabili lievi differenze nelle prestazioni di ogni elemento potrebbero essere amplificate durante la vita, portare a scompensi notevoli nello stato di carica e condurre al deterioramento complessivo del sistema. La soluzione migliore al problema consiste nel predisporre di un sistema di equalizzazione dello stato di carica degli elementi che compongono il pacco batterie. L'equalizzazione ottima si ottiene controllando singolarmente ogni cella all'interno della stringa. In alcuni casi, specie se il numero di batterie da controllare è elevato, si può ricorrere ad una soluzione di compromesso che consiste nel lavorare su piccoli gruppi di elementi per limitare la complessità del circuito di controllo.

Nel seguito verranno analizzate in dettaglio le funzioni principali del BMS: protezione e bilanciamento.

4.3 Funzione di protezione

Effetti della tensione

Il solvente dell'elettrolita delle batterie litio-ioni è infiammabile e soggetto alla decomposizione elettrochimica. Durante la carica, sorgono problemi tra i carbonati organici del solvente ed il catodo: valori della tensione di cella superiori a 4,2V possono provocare la generazione e l'accumulo di CO e CO₂: maggiore è la tensione a cui il solvente è sottoposto, maggiore è l'entità della decomposizione e della formazione di CO e CO₂. In aggiunta alla formazione di gas ad alti potenziali di cella, la decomposizione dell'elettrolita genera sottoprodotti polimerici che si depositano sul materiale attivo del catodo. Questi sottoprodotti inquinano la superficie del catodo ed inibiscono il materiale attivo, riducendo le prestazioni e la vita della cella.

Se le valvole di sicurezza della cella o il foglio di alluminio di rivestimento si aprono a causa dell'eccessiva pressione interna provocata dalla decomposizione dell'elettrolita o dall'alta temperatura, i vapori dell'elettrolita organico riempiono il contenitore della batteria. Questi vapori, nel contenitore, possono rappresentare un pericolo, in dipendenza della temperatura di innesco della miscela vapore-aria.

Tecniche di controllo e gestione devono essere usate per evitare gli alti potenziali. Evitando tensioni troppo elevate, infatti, si elimina o per lo meno si riduce la decomposizione dell'elettrolita. Mantenere le batterie al litio al massimo stato di carica (es. 100% SOC = piena carica) provoca una netta diminuzione della vita utile delle stesse e può provocare l'aumento dei rischi correlati alla sicurezza: caricare una batteria al litio ad una certa percentuale di carica (anche elevata), ma non al massimo della carica, rappresenta un modo per aumentare sia la vita utile che la sicurezza della batteria; allo stesso tempo permette di avere a disposizione gran parte della capacità totale (si può tranquillamente arrivare al 95%).

Tecniche di controllo e gestione devono anche prevenire la scarica delle batterie al litio a tensioni troppo basse (2.5 - 2.7 V a cella). A queste basse tensioni di cella, la corrente del collettore può dissolvere il rame nell'elettrolita: ciò formerà delle placche sulle particelle dell'anodo di grafite, le quali inibiranno l'utilizzazione dei materiali attivi e ridurranno le prestazioni e la vita delle celle. Il riproporsi per più volte di questi bassi valori di tensione, può condurre alla formazione di dendriti di rame e provocare corto circuiti all'interno della cella.

Effetti delle correnti

Nelle batterie al litio, adoperare limiti di corrente eccessivi può provocare il danneggiamento permanente delle stesse. Infatti, sottoposto ad alte correnti di carica, il litio può non diffondersi in modo adatto nelle particelle dell'anodo di grafite ed iniziare a placcare con litio metallico la superficie dell'elettrodo. La placcatura produce dei dendriti, i quali possono forare i separatori e formare dei corto circuiti verso il catodo. Questi corto circuiti inizialmente sono deboli, causano solamente momentanee scariche della cella, le quali provocano un vistoso abbattimento della tensione o un picco di corrente durante la carica. Con il passare del tempo, il numero di questi deboli corto circuiti aumenta, con il conseguente risultato di rendere impossibile la piena carica della cella. La placcatura del litio metallico è molto reattiva nei confronti dell'elettrolita, si avrà perciò una decomposizione dell'elettrolita vicino all'anodo che porterà all'aumento della resistenza interna e un decremento delle prestazioni della cella.

Effetti della temperatura

Durante il funzionamento in bassa temperatura diminuisce la velocità della reazione chimica. L'effetto di ridurre la temperatura di esercizio è quello di ridurre la velocità di trasformazione delle sostanze chimiche attive nella cella: questo si traduce in una riduzione della capacità di trasporto di corrente della cella, sia in carica che in scarica. In altre parole, la batteria riduce la propria capacità di gestione della potenza.

Inoltre, a bassa temperatura, il tasso ridotto di reazione (e anche la contrazione dei materiali dell'elettrodo) rallenta e rende più difficile l'inserimento degli ioni di litio negli spazi di intercalazione. Come accade con il funzionamento di alte correnti, quando l'elettrodo non può accogliere il flusso di corrente si ha conseguentemente la perdita irreversibile della capacità.

Anche l'alta temperatura può comportare diversi problemi che possono provocare la distruzione della cella. In questo caso, l'aumento di temperatura fa ottenere maggiore potenza dalla cella, aumentando la velocità di reazione, ma correnti più elevate danno luogo ad una maggiore dissipazione del calore (I^2R) e quindi anche a temperature più elevate. Questo può essere l'inizio di un feedback positivo di temperatura e, se non viene rimosso il calore più velocemente di quanto viene generato, il risultato sarà un incremento eccessivo della temperatura stessa.

Diverse fasi si hanno prima che la batteria giunga ad avere una temperatura incontrollata e ogni fase si traduce in un danno progressivamente peggiore per la cella:

- La prima fase è la suddivisione di un sottile strato, denominato SEI (Solid Electrolyte Interface), isolante per gli elettroni ma molto conduttivo per gli ioni litio, che si forma all'interfaccia anodo/elettrolita (questo strato si crea dalla decomposizione dell'elettrolita durante le fasi di formazione dell'accumulatore ed è di particolare importanza per il suo funzionamento, in quanto arresta l'ulteriore decomposizione dell'elettrolita, permettendo agli ioni di intercalare). Lo strato SEI inizia a suddividersi e una volta che viene violato l'elettrolita reagisce con il carbonio all'anodo proprio come aveva fatto durante il processo di formazione ma ad una temperatura elevata ed incontrollata. Questa è una reazione esotermica che porta la temperatura a valori più elevati.
- Come la temperatura aumenta, il calore dalla reazione anodica provoca la ripartizione dei solventi organici utilizzati nell'elettrolita rilasciando gas di idrocarburi infiammabili (etano, metano e altri), ma senza ossigeno. La generazione di gas, a causa della ripartizione dell'elettrolita, provoca l'aumento di pressione all'interno della cella. Anche se la temperatura aumenta di oltre il punto di infiammabilità dei gas rilasciati dall'elettrolita, i gas prodotti non bruciano perché non c'è ossigeno libero nella cella per provocare un incendio. Le celle sono normalmente dotate di un foro di sicurezza che permette il rilascio controllato dei gas in modo da alleviare la pressione interna nella cella ed evitare la possibilità di una rottura incontrollata (esplosione) della stessa. Una volta che i gas caldi vengono rilasciati in atmosfera possono, naturalmente, bruciare in aria.
- Successivamente il separatore di polimero si scioglie, consentendo il corto circuito tra gli elettrodi.
- Alla fine il calore della ripartizione dell'elettrolita causa la suddivisione del materiale del catodo di ossido di metallo liberando ossigeno che consente di bruciare sia l'elettrolita che il gas all'interno della cella.

La ripartizione del catodo è anche fortemente esotermica portando la temperatura e la pressione a valori ancora più elevati.

Il cobalto è stato il primo materiale utilizzato per i catodi di celle al litio secondarie, ma sono stati riscontrati problemi di sicurezza perché l'insorgenza di ripartizione chimica avviene ad una temperatura relativamente bassa ed inoltre, quando il catodo si rompe, viene rilasciata una quantità elevata di energia. Per tale motivo sono stati sviluppati catodi di materiali alternativi e il diagramma seguente ne mostra le caratteristiche di ripartizione.

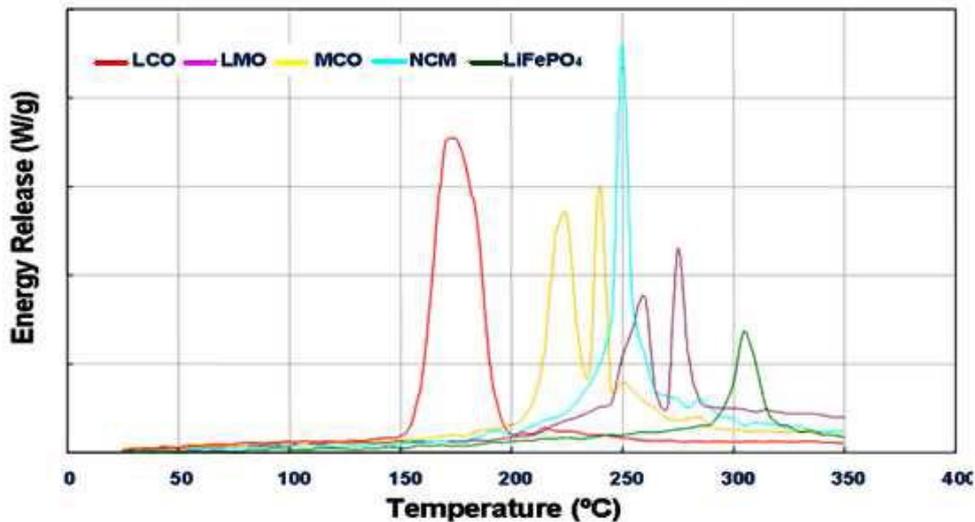


Figura 11 – Energia liberata a diverse temperature per i differenti materiali catodici

Il catodo al litio ferro fosfato si rompe con il rilascio di ossigeno a temperature molto più alte ed inoltre, quando ciò accade, viene rilasciata molta meno energia. La ragione è che gli atomi di ossigeno nel fosfato hanno un legame molto forte a causa della valenza del fosforo, che è difficile da spezzare. La chimica degli altri catodi è basata su ossidi metallici al litio che hanno legami di valenza molto più debole e si rompono più facilmente con conseguente liberazione di ossigeno.

Gli effetti della tensione e della temperatura sui fallimenti delle celle tendono ad essere immediatamente evidenti, ma il loro effetto sul ciclo di vita è meno visibile. Come detto nei paragrafi precedenti, le escursioni al di fuori del range di uso può causare la perdita irreversibile della capacità delle celle. L'effetto cumulativo di queste digressioni riduce il tempo di vita della cella o, nel peggiore dei casi, è causa di morte improvvisa.

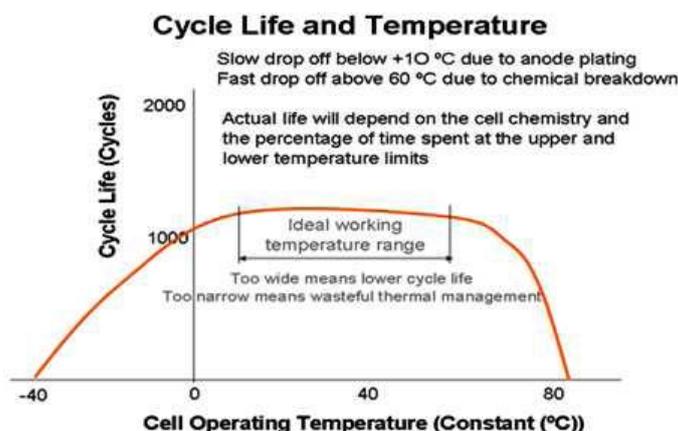


Figura 12 – Cicli vita di una cella litio in funzione della temperatura

Il grafico qui sopra mostra che al di sotto di circa 15°C i cicli vita saranno progressivamente ridotti lavorando a temperature più basse. Anche operando a temperature superiori ai 50 ° C si riduce il ciclo di vita, ma dai 70 ° C in su la minaccia è la temperatura incontrollata.

Il sistema di gestione termica della batteria deve essere progettato per mantenere il valore dei parametri di funzionamento delle celle nei rispettivi limiti in qualsiasi momento, per evitarne l'usura prematura: quanto sopra dimostra che la funzione di protezione consiste sostanzialmente nel controllo della tensione e temperatura di ogni cella.

4.4 Funzione di bilanciamento.

Ci sono molte cause di disegualizzazione delle celle [4], [5]. Uno dei fattori principali è connesso con il principio generale che non tutte le celle sono create uguali, cioè, sostanzialmente, le celle all'interno di un sistema batterie sono tutte diverse tra loro. Ciò avviene a causa delle inevitabili tolleranze di produzione. Altri fattori sono la distribuzione di temperatura all'interno del pacco ed il diverso invecchiamento delle celle. Il tutto si traduce in variazioni nell'impedenza interna, che è il parametro secondo il quale le celle si comportano durante i processi di carica e scarica. Durante la fase di carica, se nella serie c'è una cella degradata, ovvero con capacità ridotta, c'è il pericolo che appena raggiunge la carica completa essa sarà soggetta a sovraccarica per tutto il tempo impiegato dalle altre celle a raggiungere anch'esse lo stato di carica completa. Il risultato è un possibile aumento di temperatura e pressione che può danneggiare la cella. Durante la scarica, la cella più degradata sarà soggetta ad una profondità di scarica maggiore e tenderà a fallire prima delle altre. I problemi causati da queste differenze tra cella e cella aumentano quando le celle sono soggette a rapidi cicli di carica e scarica con elevati gradienti di corrente, come quelli tipici delle applicazioni dei veicoli elettrici ed ibridi. Un veicolo ibrido ovviamente ricade in questa categoria di applicazioni, in quanto per far fronte ad elevate richieste di coppia assorbe elevatissime correnti, e nel momento di un'intensa frenata (con recupero dell'energia cinetica), immette nelle batterie grandi correnti: soprattutto quest'ultimo caso è problematico per le batterie perché la corrente generata in fase di frenata può causare un rapido aumento di tensione fino a livelli potenzialmente pericolosi per la cella. Infatti, per ogni tipo di batteria è importante che la carica avvenga a tensione inferiore ad un valore di sicurezza che danneggerebbe irreparabilmente l'accumulatore. Tenere sotto controllo la tensione complessiva del pacco batteria non è sufficiente, perché a causa della dispersione dei parametri, celle nominalmente uguali possono possedere caratteristiche leggermente diverse. Ad esempio una cella con una capacità ridotta o una resistenza interna maggiore tende ad avere una variazione di tensione maggiore rispetto alle altre durante i cicli di carica/scarica e quindi è più facilmente soggetta a guasti per sovratensione.

Per le motivazioni espresse, durante i cicli di carica alcune celle potrebbero raggiungere prima delle altre la tensione finale di carica. In questo caso è indispensabile impedire a queste celle di continuare il processo di carica.

Quando una cella è danneggiata, deve essere sostituita l'intera batteria e le conseguenze sono estremamente costose. La sostituzione della singola cella non risolverebbe il problema poiché le caratteristiche di una cella "fresca" sarebbero abbastanza differenti da quelle delle celle invecchiate e ciò aumenterebbe le possibilità di rottura.

Un primo approccio nel risolvere il problema si può avere in fase di costruzione del pacco, selezionando celle il più possibile simili tra loro e disponendole in modo che la distribuzione di temperatura all'interno del pacco sia la più uniforme possibile. In un veicolo, la temperatura all'interno del vano motore, nel compartimento passeggeri o nel bagagliaio sono significativamente differenti e distribuire le celle attraverso il veicolo per ripartire il peso può causare condizioni termiche di esercizio non uniformi. D'altro canto, se le celle sono concentrate in un unico grande pacco, le celle esterne, in contatto con l'ambiente esterno, possono raffreddarsi maggiormente di quelle interne, a meno che non si preveda un sistema di raffreddamento.

Per fornire una soluzione dinamica a questi problemi, il BMS deve incorporare una funzione di bilanciamento: ciò viene ottenuto sostanzialmente mediante il monitoraggio dello stato di carica delle singole celle ed il controllo della carica applicata ad ogni cella nel pacco durante la fase di carica. Una tecnica di equalizzazione efficace deve permettere a tutti gli elementi di raggiungere la tensione di carica finale inibendo la carica alle celle già completamente cariche; solo al raggiungimento della completa carica di tutte le celle di potrà interrompere il processo.

4.5 Metodi di bilanciamento.

Le batterie al piombo e al nichel possiedono una sorta di metodo di bilanciamento naturale. Infatti, possono essere portate in regime di sovraccarica (per un periodo di tempo non eccessivo ed un regime non troppo severo) senza recare danno permanente alle celle. Infatti, le celle cariche non continuano a caricarsi, ma rilasciano l'energia sotto forma di gas attraverso la valvola di sfiato di cui sono dotate, fino a quando le celle più deboli raggiungono lo stato di carica completa. Similmente, in fase di sovrascarica (sempre per tempi limitati e regimi non troppo severi), l'energia viene rilasciata in forma di incremento della temperatura di cella, senza che ciò ne comporti il danneggiamento permanente. Questo costituisce un metodo naturale di bilanciamento per una stringa di tali celle in serie. *L'argomento è trattato nel report "Uso di batterie al litio in applicazioni SLI e navali" prodotto dall'Università di Pisa, al quale si rimanda per maggiori dettagli.*

L'idea base del bilanciamento per batterie al litio è quella di usare circuiti esterni per bilanciare le celle. Si fa distinzione tra tecniche di bilanciamento di tipo passivo ed attivo. Nel caso del bilanciamento passivo, il circuito esterno è di tipo resistivo e viene utilizzato per dissipare l'energia in eccesso su resistori connessi in parallelo ad ogni singola cella e livellare la distribuzione dei valori di stato di carica delle varie celle all'interno del sistema batterie. Nel caso del bilanciamento attivo, il circuito esterno viene usato per estrarre l'energia dalle celle più cariche e distribuirla a quelle meno cariche o per caricare selettivamente le celle in funzione del loro stato di carica: in tal modo il livellamento della distribuzione dei valori dello stato di carica delle celle all'interno del sistema viene ottenuto senza dissipazione dell'energia su componenti passivi.

Sono disponibili molti metodi di bilanciamento: nel seguito, i principali tra questi saranno brevemente presentati per tipologia di circuito [4], [6].

Equalizzazione passiva

Con questa tecnica ogni cella (o gruppo di celle) ha in parallelo la serie di un resistore e un elemento di commutazione (interruttore).

Gli interruttori vengono comandati da una logica di controllo che chiude selettivamente le batterie che hanno raggiunto la carica completa sulle rispettive resistenze: l'intera corrente di carica bypassa le celle completamente cariche e l'energia ad essa associata viene dissipata sulle resistenze, fino a che le celle più deboli, che continuano a caricarsi, raggiungono anch'esse lo stato di carica completa.

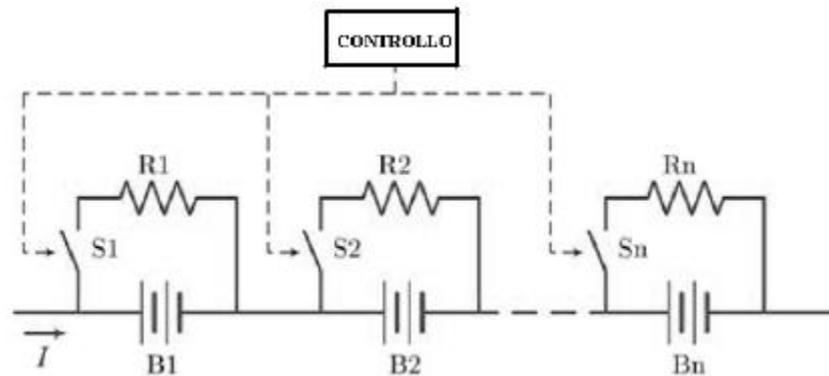


Figura 13 – Tecnica di equalizzazione passiva

I principali vantaggi di questa tecnica sono la semplicità circuitale e di realizzazione, la velocità nell'equalizzazione. Gli svantaggi sono la richiesta di resistenze in grado di dissipare potenze che possono essere anche notevoli e la necessità di avere interruttori capaci di interrompere correnti elevate; queste esigenze possono portare a costi elevati e limitano il campo di utilizzo ad applicazioni di potenze medio/basse.

Questo metodo, detto di "livellamento verso l'alto", bypassa semplicemente le celle che hanno raggiunto lo stato di carica completa. Altri metodi, detti di "livellamento verso il basso", individuano le celle più cariche all'interno del pacco e le scaricano sui resistori di bypass fino a che raggiungono il valore di carica delle celle più deboli: la carica continua fino a che tutte le celle sono completamente cariche, ma si limita la tensione che può essere applicata alle singole celle e si bypassano le celle quando questa tensione è stata raggiunta. Siccome le correnti di bypass usate sono basse, i tempi di equalizzazione sono molto lunghi. La prestazione del pacco batterie è determinata dalla cella più debole, perché per completare la carica bisogna attendere che si carichi completamente la cella più debole. Questo metodo è comunque quello con costo più basso.

Equalizzazione attiva

L'equalizzazione attiva delle celle permette di avere un'efficienza energetica maggiore in quanto l'energia immagazzinata dalla/e cella/e più cariche non viene dissipata ma ridistribuita alle celle che si trovano a livelli di carica inferiori; per questa ragione vengono utilizzati elementi non dissipativi quali condensatori, induttori o trasformatori. Esistono due tecniche di equalizzazione attiva: a spostamento di carica (charge shuttling) e a convertitori di energia (energy converters).

Charge shuttling

Questa tecnica consiste in un meccanismo di rimozione di parte della carica presente in una cella con carica in eccesso, l'immagazzinamento in un dispositivo (condensatore) e la ricarica di un secondo elemento.

Esistono diverse soluzioni circuitali per implementare questo tipo di equalizzazione, il più utilizzato è quello che sfrutta come dispositivo per l'immagazzinamento della carica un condensatore (flying capacitor).

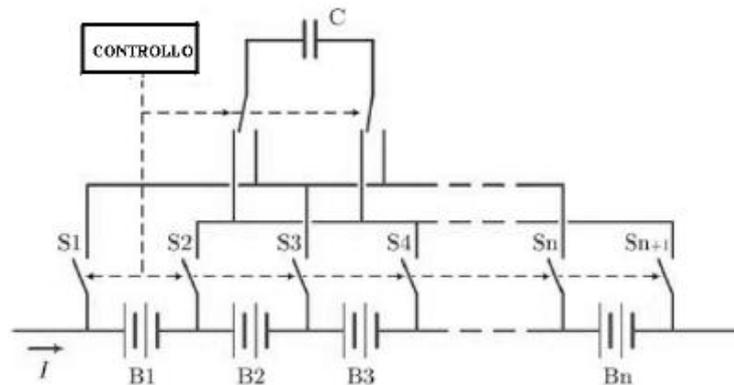


Figura 14 - Tecnica di equalizzazione attiva a spostamento di carica (charge shuttling) di tipo flying capacitor

Un primo tipo di funzionamento è il seguente: l'elettronica di controllo chiude a passi prefissati gli interruttori su una cella (ad esempio B1, chiudendo S1 e S2) collegandola in parallelo al condensatore. In questo periodo si ha una redistribuzione di carica tra i due, il componente a tensione maggiore cede carica all'altro. Successivamente gli interruttori vengono aperti ed il condensatore viene posto in parallelo ad una seconda cella (ad esempio B2, chiudendo S2 e S3). Tra il condensatore e la nuova cella si avrà un'ulteriore redistribuzione di carica. Il condensatore viene successivamente collegato sequenzialmente a tutte le altre celle, in questo modo si riesce a distribuire uniformemente la carica con l'effetto di una equalizzazione.

L'elettronica di controllo, in questo caso è molto semplice perché deve solo chiudere a passi prefissati gli interruttori ed aprire il circuito di ricarica una volta che tutte le batterie siano state caricate. Con questo metodo di funzionamento, il condensatore media il livello di carica sulle celle, prelevando carica dalle celle con tensione più alta del valore medio ed immettendola nelle celle con tensione più bassa del valore medio.

Una variazione del circuito precedente permette di diminuire il tempo di equalizzazione solo cambiando l'algoritmo con cui si comandano gli interruttori. In questo caso però la tensione di ogni singola batteria deve essere misurata per consentire al controllore di effettuare tramite il condensatore una redistribuzione di carica fra la cella a tensione più elevata e quella a tensione più bassa.

In questo modo il tempo per l'equalizzazione è notevolmente ridotto soprattutto se le celle a tensioni maggiore ed inferiore sono distanti nella serie di batterie.

Qualunque sia la tecnica impiegata per il pilotaggio degli interruttori, per equalizzare n batterie questo metodo richiede $n + 3$ interruttori, che devono essere dimensionati per la corrente di picco richiesta dal condensatore. Le perdite dovute alla resistenza serie del condensatore e le perdite di conduzione degli interruttori possono, oltre a peggiorare notevolmente il rendimento del sistema, rallentano il transitorio di carica ed inevitabilmente aumentano il tempo richiesto per l'equalizzazione. Maggiore è la capacità delle batterie da gestire, più grande dovrà essere il

condensatore usato e maggiore sarà la costante di tempo di carica; un transitorio da carica lento costringe ad utilizzare una frequenza di commutazione inferiore aumentando notevolmente i picchi di corrente. Già batterie di capacità dell'ordine di 50 Ah richiederebbero un condensatore di grande capacità (e quindi ingombrante) ed interruttori capaci di interrompere correnti estremamente elevate.

Un metodo di equalizzazione alternativo, sempre basato sulla tecnica flying capacitor, prevede l'utilizzo di un condensatore per ogni coppia di batterie (vedi figura sottostante). Gli interruttori commutano a passi regolari ponendo alternativamente il condensatore ai capi di una delle batterie. La batteria più carica in questo modo cede energia alla batteria meno carica. Anche in questo caso l'elettronica di controllo è molto semplice.

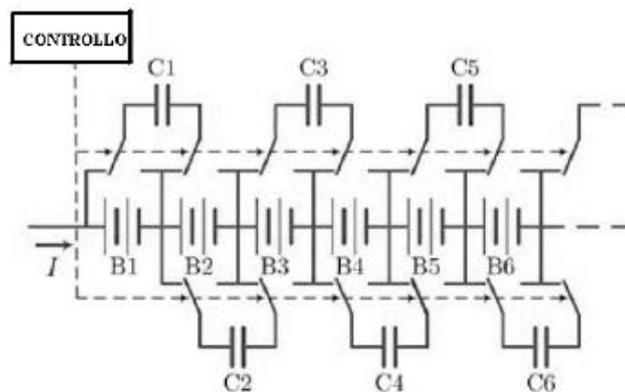


Figura 15 - Tecnica di equalizzazione attiva a spostamento di carica di tipo flying capacitor (seconda opzione)

L'equalizzazione avviene in tutte le celle perché ciascuna cella ha in comune un condensatore con la cella vicina e questo permette il passaggio di carica dall'inizio alla fine del pacco. Questo metodo richiede molto tempo per equalizzare tutte le batterie in quanto la carica deve attraversare più celle, con un aumento anche delle perdite. L'unico vantaggio rispetto ai metodi già elencati è che il condensatore, il circuito di controllo e la sua alimentazione possono essere integrati già durante la fase di creazione della batteria (contenente due celle) dando luogo a soluzioni particolarmente compatte.

L'equalizzazione attiva a spostamento di carica (charge shuttling), ha efficienza tanto minore quanto più sono ridotte le differenze di tensione tra le celle: questo vuol dire che se la disequalizzazione tra le celle all'interno del sistema è ridotta, l'equalizzazione attiva risulta addirittura sfavorita, perché poco efficiente e più costosa, rispetto a quella passiva. Altro problema può essere quello dell'ingombro dei condensatori.

Energy converters

Questa seconda tipologia di equalizzazione si basa sulla conversione di energia svolta da elementi quali induttori e trasformatori per spostare energia da una cella ad un'altra. Si hanno due principali energy converters: switched transformer e shared transformer.

Il metodo switched transformer (vedere figura sottostante) adotta una struttura simile a quella del flying capacitor, dove al posto del condensatore è inserito un trasformatore.

La corrente di carica non entra direttamente nel pacco di batteria ma è deviata dal transistor sul trasformatore. L'uscita del trasformatore è raddrizzata da un diodo e applicata alla n-esima cella attraverso la scelta degli interruttori. In questo caso è richiesto un controllo elettronico

per la scelta della cella da caricare (quella a tensione minore) e per il controllo del transistor e degli interruttori.

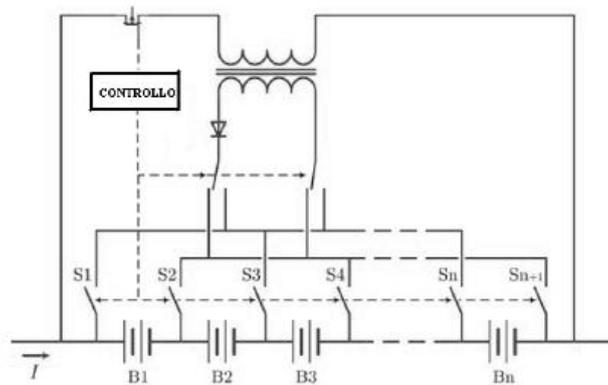


Figura 16 - Tecnica di equalizzazione attiva a convertitori di energia (energy converters)

Questo metodo permette di caricare velocemente la cella più scarica e di evitare il problema della piccola differenza di tensione tra le celle, ma a costo di non fornire energia all'intero gruppo di batteria. Il principale svantaggio è l'aumento della complessità e del costo dei componenti, oltre la necessità di avere l'avvolgimento del secondario del trasformatore ben bilanciato, altrimenti esso contribuirà al problema dell'equalizzazione invece che risolverlo.

Il secondo metodo "shared transformer" (vedere figura sottostante) utilizza un trasformatore che presenta un avvolgimento primario e tanti secondari quanti sono le batterie. La corrente è deviata sul primario del trasformatore ed induce una corrente sui secondari. Questa viene raddrizzata dal diodo e il secondario con la minor resistenza, dovuta alla minor tensione (batteria più scarica) ai suoi capi, riceverà una corrente maggiore.

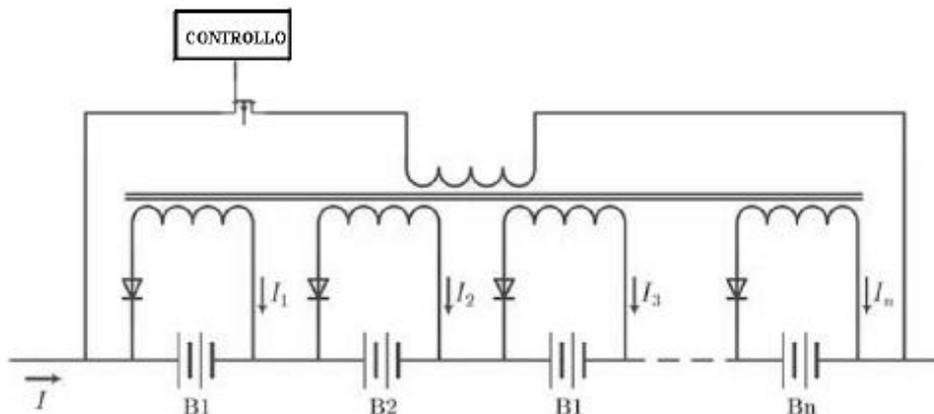


Figura 17 - Tecnica di equalizzazione attiva a convertitori di energia (energy converters) "shared transformer"

In questo modo la corrente per ogni batteria è inversamente proporzionale al suo stato di carica. Gli unici componenti attivi sono il trasformatore ed un interruttore, ed è richiesto un controllo più semplice del caso precedente in quanto non si deve monitorare la tensione delle batterie o prendere decisioni sulla scelta di quali interruttori chiudere o aprire.

Questo tipo di equalizzazione permette un rapido bilanciamento di un pacco multiplo di celle con una minima perdita. I principali svantaggi sono la complessità del circuito magnetico e l'assoluta mancanza di modularità.

Un'ultima variante di questo circuito consiste nell'utilizzo di un trasformatore per ogni cella, in questo modo la struttura si presenta più modulare, ma si ha un aumento di costo ed ingombro.

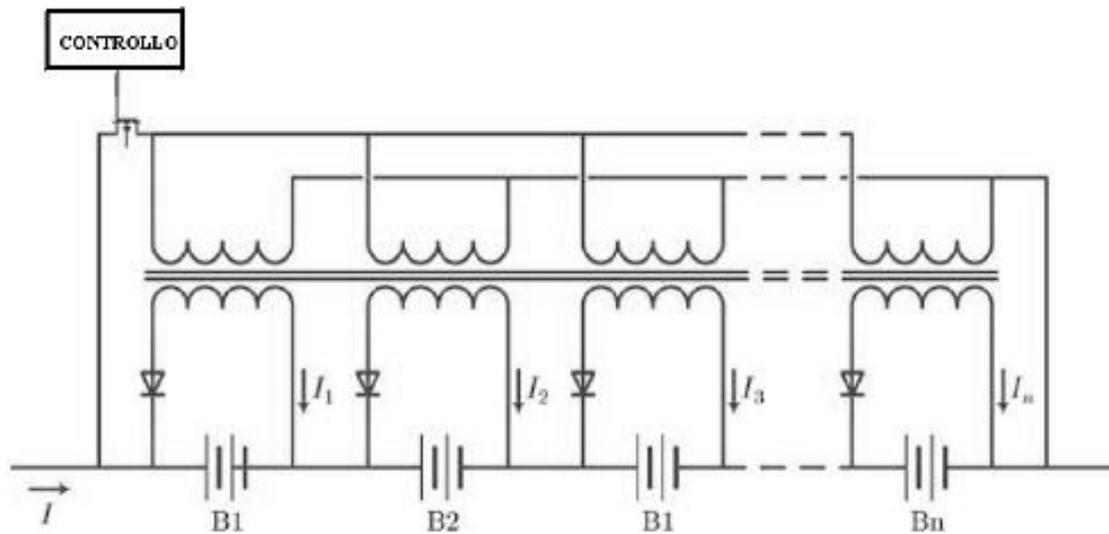


Figura 18 - Tecnica di equalizzazione attiva a convertitori di energia (energy converters): variante con un trasformatore per ogni cella

Queste ultime soluzioni sono le più diffuse per applicazioni automobilistiche, vengono preferite in quanto sono molto efficienti nella conversione dell'energia, anche se di contro occupano un notevole spazio a causa dei trasformatori.

4.6 Valutazione comparata di alcuni Battery Management Systems commerciali.

Alla luce dell'analisi effettuata sulle varie tipologie di BMS, ed in vista dell'emissione delle specifiche per il BMS del sistema modulare, sono stati approvvigionati tre BMS commerciali per effettuare una valutazione comparata. Parallelamente sono state acquistate delle batterie (di cui si dirà con maggior dettaglio più avanti) da impiegare per il test dei BMS. Due sistemi BMS sono stati consegnati solo a ridosso del periodo finale dell'attività di Ricerca di Sistema Elettrico relativa all'anno corrente, mentre il terzo BMS e le batterie sono ancora in fase di approvvigionamento. Per tali ragioni la valutazione dei BMS può essere eseguita per ora solo su base teorica. La stessa sarà supportata dai risultati dei test che verranno eseguiti nel corso dell'attività del prossimo anno sui BMS acquistati, appena completato l'approvvigionamento.

I sistemi acquistati rappresentano lo stato dell'arte di ciò che è commercialmente disponibile (cioè acquistabile) sul mercato: tra essi, uno è del tipo con bilanciamento semiattivo, gli altri due con bilanciamento passivo. Non avendo chiesto l'autorizzazione per la pubblicazione dei dati ai vari fornitori, i BMS saranno nel seguito indicati come BMS tipo A, B e C.

4.6.1 BMS Tipo A

Descrizione

L'architettura di base del circuito di monitoraggio "BMS" è costituita da alcune schede trasmettenti "TX", ciascuna connessa direttamente a 6 celle ed in grado di rilevarne le caratteristiche, n°1 unità ricevente "RX", un sensore isolato di corrente ed il software di

gestione. Ogni scheda trasmittente TX è costituita da due circuiti identici che monitorano ognuno 3 celle, autoalimentandosi da esse. La capacità potenziale di gestione del sistema è pari a 100 celle. La versione acquistata è costituita da 1 unità ricevente RX e 6 unità trasmettenti TX per una capacità di monitoraggio di 36 celle.

La singola unità TX è un modulo di lettura ed equalizzazione ed è in grado di:

- monitorare singolarmente la tensione e la temperatura di 6 celle;
- autoalimentarsi dalle stesse celle con basso assorbimento;
- trasmettere le informazioni all'unità ricevente mediante comunicazione CAN;
- avviare la funzione di bilanciamento energetico semiattivo (costituito cioè da una parte attiva, di scambio energetico tra le celle ed una parte, pochi Watt, passiva dissipativa) delle celle qualora il modulo centrale lo richieda.

L'unità ricevente RX, alimentata a 12-24V da un circuito ausiliario (es. batteria di servizio o alimentatore), è in grado di:

- ricevere le informazioni di tensione e temperatura delle singole celle;
- campionare la corrente mediante un sensore ad effetto Hall isolato, collocato sul cavo di potenza (polo positivo) del sistema batterie;
- rilevare la propria tensione di alimentazione;
- elaborare i dati in conseguenza a quanto raccolto ed inviare i risultati sulle linee di comunicazione CAN, USB o RS232. I principali parametri trasmessi sono: le tensioni e le temperature di tutte le celle, la tensione e la corrente di pacco, lo stato di carica "SOC" del pacco, eventuali allarmi di tensione massima o minima di pacco o di singola cella, allarmi di temperatura massima e minima, preallarmi di temperatura;
- controllare la fase di carica effettuata con caricabatterie esterni mediante un segnale PWM passivo e optoisolato oppure attraverso una seconda linea CAN dedicata appositamente al caricabatterie. In tal modo l'unità è in grado di gestire la fase iniziale di carica a corrente costante, seguita dalla riduzione progressiva fino a zero della corrente quando una qualsiasi cella raggiunge il valore di 4,20V, oppure quando la tensione totale raggiunge il valore massimo. La riduzione della corrente di carica inizia a circa 4,10 V/cella;
- rendere disponibili due uscite relè con contatti in scambio per segnalazioni d'allarme, che possono essere configurate in funzione delle esigenze operative;
- condizionare tramite una rete CAN bus il driver durante la scarica;
- creare un registro storico dei dati misurati, dando la possibilità di ricostruire le cause di eventuali anomalie o danneggiamenti del pacco batterie e monitorare l'invecchiamento del pacco stesso (numero di cicli), oltre che registrare tutta l'energia estratta o caricata.

Attraverso il pacchetto software ed un PC dotato di porta USB o RS232, è possibile rilevare e visualizzare numericamente ed in forma grafica tutti i dati sopraelencati.

E' inoltre possibile adattare il sistema alle varie esigenze di lavoro modificando parzialmente gli estremi d'uso, come ad esempio la soglia di alcuni allarmi e gli allarmi con uscite a relè, assegnando ad essi diverse funzioni e modi d'intervento.

Si riporta di seguito un'immagine dei componenti e vengono elencate le caratteristiche principali dei moduli di letture TX e del modulo centrale RX.



Figura 19 - Componenti del BMS acquistato

Principali caratteristiche tecniche del modulo di lettura ed equalizzazione TX

Alimentazione:	8 ÷ 28 V _{DC} .
Consumo:	in stand-by < 1µA per cella, in lettura e trasmissione dati < 15mA.
Equalizzazione:	potenza tipica 2W/cella, tensione massima di cella come da caratteristiche del Costruttore, tensione minima per start equalizzazione 3,50 V.
Ingressi celle:	6.
Ingressi termistori:	6 + 1 per letture remote.
Comunicazione:	CAN 2.0
Temperatura d'esercizio:	-30°C ÷ +80°C.
Temperatura di stoccaggio:	-30°C ÷ +80°C.
Umidità relativa:	max. 95%.
Grado di protezione:	IP50.
Dimensioni:	84x70x39 mm.

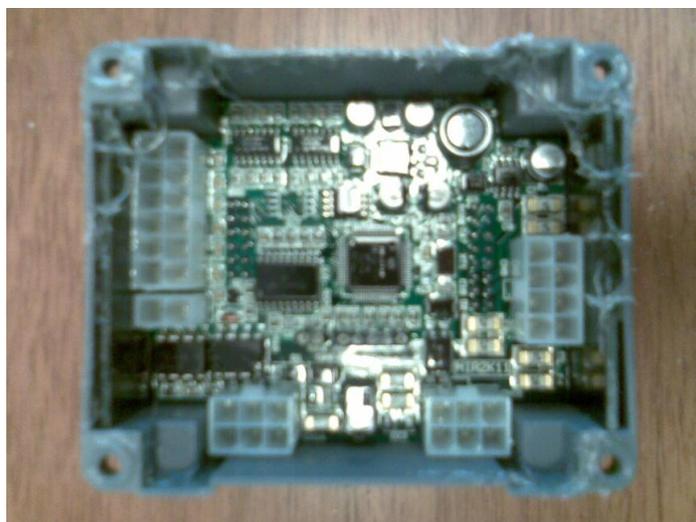


Figura 20 - Scheda TX

Principali caratteristiche tecniche dell'unità centrale RX

Alimentazione:	8 ÷ 32 V _{DC} .
Consumo:	max. 400mA @ 24 V _{DC} .
Comunicazione:	1^ linea CAN per pannello di visualizzazione. CAN 2.0 – 250 kbps; 2^ linea CAN per controllo della carica; 3^ linea CAN per TX. CAN 2.0 – 250 kbps; RS232 max. 230 kbps; USB max. 480 kbps;
PWM:	1 uscita isolata.
Lettura corrente di pacco:	sensore ad effetto Hall, dimensionabile.
Uscità relè:	2 contatti in scambio.
Sensore di temperatura:	rilevamento temperatura interna contenitore.
Temperatura d'esercizio:	-30°C ÷ +80°C.
Temperatura di stoccaggio:	-30°C ÷ +80°C.
Umidità relativa:	max. 95%.
Grado di protezione:	IP50.
Temperatura d'esercizio:	-30°C ÷ +80°C.
Temperatura di stoccaggio:	-30°C ÷ +80°C.
Umidità relativa:	max. 95%.
Grado di protezione:	IP65.
Dimensioni:	190x180x51 mm.



Figura 21 - Scheda RX

Software di gestione

Nella schermata del software vengono visualizzati i seguenti parametri:

- in alto/sinistra, la casella indicante il numero del pacco batteria e la selezione della porta seriale;
- in alto/centro-sinistra, i 2 pulsanti di Start/Stop acquisizione, con la casella di selezione dell'intervallo di campionamento;
- in alto/centro, indicatore analogico della temperatura media del vano batterie, con il valore numerico sottostante;
- in alto/centro-destra, barra indicatrice dello stato di carica delle batterie SOC;
- in alto/destra, i 5 Led di visualizzazione allarmi che verranno attivati sia in caso di perdita di comunicazione tra TX e RX, sia in caso di variazioni anomale di tensione e/o temperatura;
- in alto/destra, il pulsante "QUIT" per la chiusura del programma;
- al centro, le barre analogiche rosse contornate di giallo evidenziano graficamente la tensione di ogni singola cella, mentre le due linee orizzontali bianche identificano l'escursione dalla tensione minima alla tensione massima consigliate dalla casa costruttrice;
- al centro, le barre analogiche rosse contornate di blu evidenziano graficamente la temperatura di ogni cella, mentre le due linee orizzontali bianche identificano le temperature massima e minima di lavoro;
- in basso vengono visualizzate le caselle dei valori numerici di tensione e temperatura di ogni singola cella;
- in centro/destra, barra indicatrice della tensione totale di batteria, con il valore numerico sottostante;
- in centro/destra, barra indicatrice della corrente di batteria, con il valore numerico sottostante;
- in basso/destra, barra indicatrice della tensione di batteria ausiliaria, (12 o 24V) con il valore numerico sottostante;
- in basso/destra, la tensione e la temperatura di cella massima e minima.

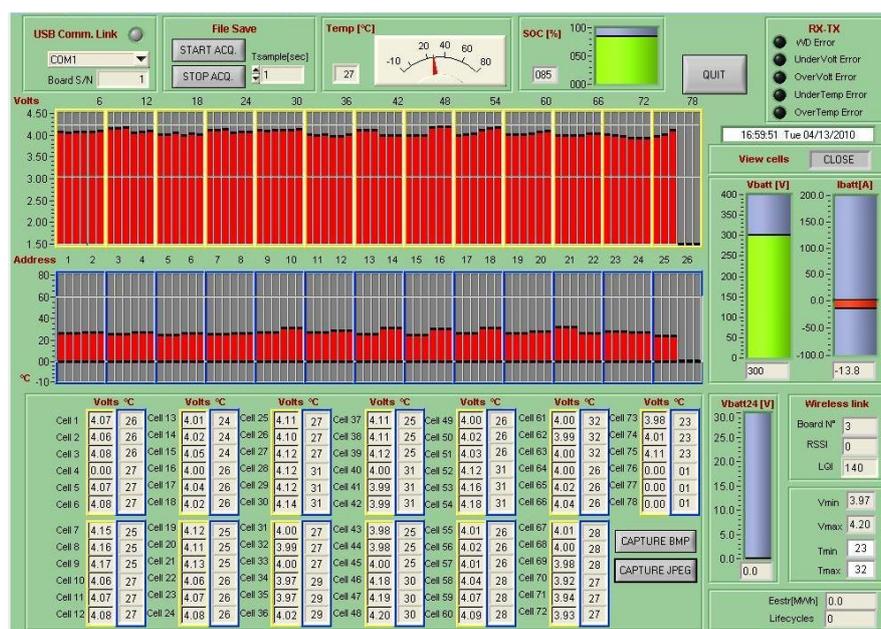


Figura 22 - Schermata del software

Acquisizione e memorizzazione dei parametri di batteria

Mediante i pulsanti "START ACQ.", "STOP ACQ." e "Tsample" posizionati nel riquadro "File Save" è possibile memorizzare i parametri di batteria, cioè tutti i dati visualizzati nella schermata di monitoraggio in formato numerico.

In particolare, il pulsante "Tsample" consente la selezione del tempo di campionamento tra un minimo di 1 secondo ed un massimo di 600 secondi. Il valore è impostabile mediante i due pulsanti o la digitazione nell'apposita casella.

Il pulsante "START ACQ." permette di avviare la registrazione dati, per generare un file in formato .CSV. La modifica dell'estensione del file generato, da .CSV a .XLS, consente al programma Microsoft Excel di aprire il file in formato tabellare mediante opportuno percorso guidato.

Il pulsante "STOP ACQ." arresta l'acquisizione.

Il BMS acquistato risulta essere di facile comprensione per l'utente e il suo utilizzo è abbastanza semplice. Presenta notevoli vantaggi ed è possibile variare alcuni parametri in modo da gestire a proprio piacimento l'applicazione in cui è utilizzato. Infatti è possibile variare la tensione massima e minima di cella in modo da decidere il range di funzionamento ottimale del pacco batteria ed impostare limiti di temperatura per garantire la protezione contro un fallimento ed una maggiore durata della vita.

4.6.2 BMS Tipo B

Il BMS fornisce: protezione per overvoltage ed undervoltage, bilanciamento passivo delle celle, controllo di carica e del contattore per disconnettere il sistema batterie in caso di allarme, informazioni sullo stato del sistema batterie e comunicazione dati.

Il sistema è costituito da una scheda master, "Battery Management Control Unit" (BMCU), a cui sono connesse delle schede slave "Local Monitoring Units" (LMU), ciascuna capace di monitorare fino ad 8 celle. Il sistema è scalabile fino ad una capacità massima di 256 celle, ottenibile connettendo 32 schede LMU alla scheda centrale BMCU. La scheda BMCU ospita l'intelligenza di sistema, includendo il modello della batteria, la logica di controllo del contattore, la memoria, l'interfaccia dati, gli input/output per il controllo del/i contattore/i e la ricezione degli input, le uscite per il controllo della carica. Le schede LMU sono responsabili del monitoraggio e controllo a livello di cella (tensioni), del bilanciamento, della misura di temperatura in 2 punti del pacco batterie mediante altrettanti sensori e della scheda stessa mediante un sensore a bordo della scheda. Il sistema di bilanciamento della scheda LMU sopporta una corrente di equalizzazione fino a 0,5 A.

Nella versione acquistata, le schede sono allocate in apposita custodia (vedere figura), ma è anche possibile la fornitura delle schede elettroniche sciolte. L'insieme delle schede nella relativa custodia prende il nome di unità.



Figura 23 - BMS Tipo B, versione "housed units"

L'unità centrale prende il nome di "unità di controllo" e può gestire fino a 16 celle in serie (nella custodia sono evidentemente allocate la scheda master e due schede slave). L'unità slave prende il nome di "unità di monitoraggio" e può gestire fino a 16 celle (nella custodia sono evidentemente allocate due schede slave). La capacità del sistema (monitoraggio di 256 celle) può essere raggiunta connettendo all'unità master 15 unità di monitoraggio. La configurazione acquistata è costituita da un'unità di controllo ed un'unità di monitoraggio, per la gestione di un totale di 32 celle.

Come mostrato, il BMS è modulare e scalabile. Inoltre è configurabile per tutte le chimiche di batterie al litio ed il software PC consente la configurazione on site dei parametri del sistema batterie. Di seguito si riporta un elenco delle principali funzioni eseguite:

- Misura di SOC, SOH, corrente di pacco, tensione, temperatura.
- Protezione overvoltage and undervoltage.
- Rilevazione fughe di corrente, corto circuiti e guasto dell'isolamento.
- Controllo della carica mediante PWM, CAN o segnale analogico.
- Visualizzazione dati in tempo reale mediante interfaccia PC RS232 o CAN.
- Configurazione uscite di comando dei contattori.
- Monitoraggio e protezione individuale delle celle.

Principali caratteristiche tecniche della scheda di controllo (BMCU)

La scheda di controllo è responsabile del controllo a livello di sistema, pertanto fornisce il controllo complessivo del pacco batterie includendo la protezione per overvoltage ed undervoltage, il bilanciamento delle celle, la disconnessione del pacco batterie dal carico in condizioni di allarme, il controllo di carica, l'interfaccia dati, gli inputs ed outputs per ogni connessione e notificazione alle periferiche esterne (sensori e sistemi), la misura dei parametri di prestazione a livello di pacco (tensione, corrente, SOC ed SOH), la terminazione della connessione in serie delle schede di monitoraggio LMU, il controllo ventilatori (se presenti). Nella scheda di controllo c'è inoltre un sistema odometrico per la memorizzazione di eventi per la storia del pacco batterie. Si riportano di seguito le specifiche principali.

Dimensioni: 100x160 mm.

Alimentazione: $9 \div 32 V_{DC}$.

Consumo:	< 80mA (esercizio), < 200 μ A (stand-by).
Numero di LMU supportate:	32 (256 celle in serie).
Data I/O:	8 ingressi/uscite relè configurabili, capacità 10 A.
Controllo di carica:	PWM, CAN, Analogico.
Protezioni:	corto circuito, dispersione, guasto all'isolamento, eccesso di carica/scarica, temperatura (minima e massima).
Bus dati:	CAN (per interfaccia con sistemi esterni), RS232 (per interfaccia PC per diagnostica).
Temperatura di esercizio:	-40°C ÷ +105°C.
Temperatura di storage:	-50°C ÷ +125°C.
Grado di protezione:	IP61.

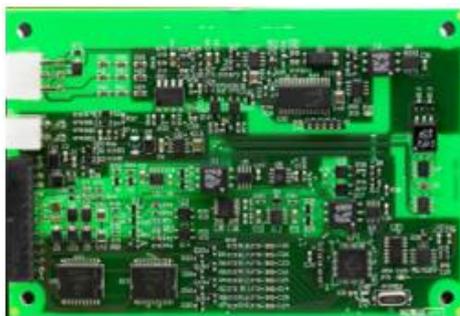


Figura 24 – Scheda BMCU

Principali caratteristiche tecniche della scheda di monitoraggio (LMU)

La scheda LMU è responsabile del monitoraggio e controllo a livello di cella: misura la tensione delle singole celle e la temperatura del modulo batterie di appartenenza e della scheda stessa, fornisce la circuiteria per il prelievo di energia dalle singole celle in carica durante il bilanciamento. E' capace di monitorare con continuità da 3¹ fino ad 8 celle e fino a 32 schede LMU possono essere connesse in serie e controllate da un'unica scheda master BMCU (quest'ultima rileverà automaticamente il numero di schede LMU ad essa connesse, rimuovendo la necessità di settaggio manuale: ciò rende le dimensioni e la tensione del pacco regolabili aggiungendo o rimuovendo celle molto velocemente e semplicemente. Si riportano di seguito le specifiche principali della scheda LMU.

Dimensioni: 100x160 mm.

Alimentazione:	4,5 ÷ 24 V _{DC} .
Consumo:	< 50mA (esercizio), < 100 μ A (stand-by).
Numero di celle supportate:	da 3 ad 8 in serie.
Accuratezza di misura della tensione:	< \pm 10mV.
Accuratezza di misura della temperatura:	\pm 3°C.
Corrente di bilanciamento delle celle:	0 ÷ 2 A, regolata da PWM usando resistori sulla scheda.
Temperatura di esercizio:	-40 ÷ +105°C.
Temperatura di storage:	-50 ÷ +125°C.
Grado di protezione:	IP61.

¹ Il numero minimo di celle è giustificato dal fatto che la scheda LMU si alimenta dalle celle: sono necessari almeno 6 V_{DC} per alimentare la scheda LMU.

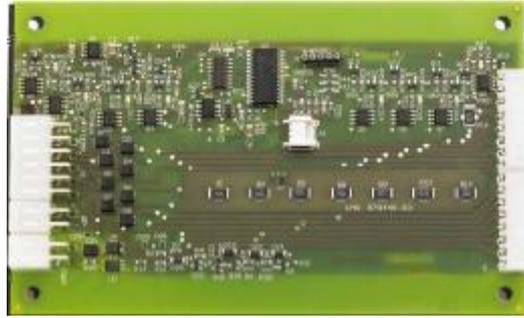


Figura 25 – Scheda LMU

Software di gestione

Il software è il mezzo per eseguire una semplice configurazione del BMS e mostrare il monitoraggio e le prestazioni del pacco batterie. La procedura ha inizio con l'introduzione del firmware dell'utente nel BMS e prosegue con un'interfaccia facile da usare per settare i parametri del pacco batterie come tensioni di cut-off, rate di scarica consentiti, curve di compensazione per il calcolo del SOC e messaggi CAN per comunicare con il carico/applicazione, settaggio del controllo di carica.

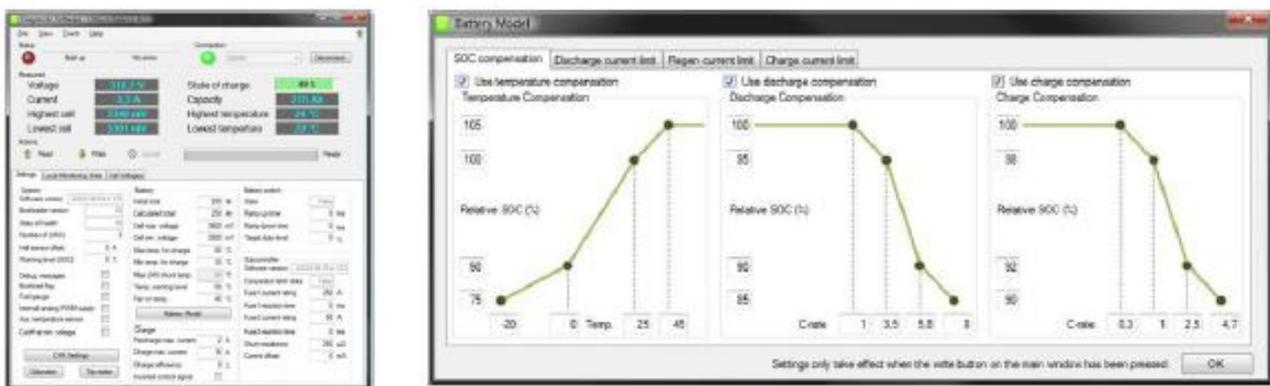


Figura 26 - Interfaccia software mostrante lo stato del pacco batterie con le opzioni di configurazione (sinistra) e finestra per le impostazioni di settaggio della compensazione per il calcolo del SOC (a destra).

4.6.3 BMS Tipo C

Il BMS tipo C, rappresentato nella figura seguente, è concepito secondo lo schema "master & slave" ed è costituito da quattro parti:

- l'unità centrale, con funzione di scheda master, dimensioni 190 x 155 x 45 mm, peso circa 0.5 kg, capacità di controllo fino a 48 unità², tensione di batteria (intero pacco) ≤ 144 V,
- l'unità ausiliaria, con funzione di scheda slave, dimensioni 255 x 170 x 25 mm, peso circa 0.4 kg, capacità di controllo fino a 16 unità, completa di cablaggi per la raccolta dei dati di tensione parziale e temperatura delle singole unità

² Il termine "unità" è riservato alle singole celle o ai gruppi di celle eventualmente connesse in parallelo per aumentare la capacità, con tensione nominale pari a 3.2 V.

- sensore di corrente 500 A,
- touch screen 5.7"

La funzione di equalizzazione viene realizzata all'interno della scheda slave, durante la carica. La comunicazione tra la scheda slave e quella master, e tra quest'ultima ed il caricabatteria e/o il controllore del motore, avviene tramite CAB BUS. Nel caso del prototipo da laboratorio il caricabatteria è sostituito dal ciclatore, che attualmente non è provvisto di capacità di comunicazione CAN: in questo caso, si rende necessaria l'aggiunta di un relè per disconnettere le batterie in caso di anomalie.

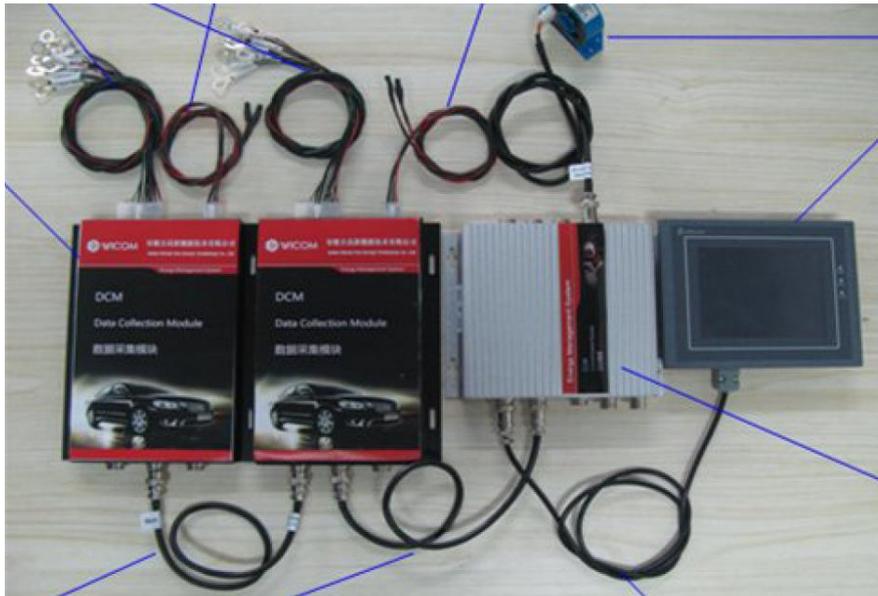


Figura 27 - BMS Tipo C

5. Batterie litio-ioni per avviamento.

L'argomento è trattato in dettaglio nel report "Uso di batterie al litio in applicazioni SLI e navali" prodotto dall'Università di Pisa. In questo paragrafo si riporta una sintesi dell'argomento, rimandando al documento suddetto per la trattazione dettagliata.

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.

Per questo tipo di applicazioni lo standard di fatto 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.

Pertanto è stato valutato preventivamente se e quali delle tecnologie 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. La valutazione è stata condotta con riferimento ai parametri di maggior interesse per l'applicazione in esame.

Tutti i carichi del veicolo sono compatibili con una finestra di tensione che va, tipicamente, dai 13,5V ai 15 V. Una nuova batteria che si voglia sostituire alle batterie esistenti dovrà analogamente fornire tensione in questo intervallo. Se si considerano ad esempio batterie Nichel/Cobalto/Alluminio, comunemente denominate NCA, dalle iniziali degli elementi che compongono il catodo, la finestra di tensione di normale funzionamento della singola cella 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.

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

La sostituzione di una batteria di avviamento tradizionale con una batteria di altro tipo deve inoltre essere verificata a livello di capacità nominale e prestazione all'avviamento.

Le batterie automobilistiche di tipo SLI solo in casi eccezionali vengono scaricate a fondo. Normalmente, invece, esse sono soggette a piccole scariche poco profonde ed il loro invecchiamento è dovuto all'effetto combinato di questi microcicli e dell'invecchiamento naturale, 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 parametri di invecchiamento per scariche poco profonde ed invecchiamento cronologico (shelf-life).

Per quanto riguarda le tensioni, si è visto che la compatibilità con l'applicazione SLI si ha con certezza utilizzando una serie di 4 celle aventi la chimica LFP.

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, quindi acquistabili, si riducono fortemente. In seguito all'indagine bibliografica effettuata appaiono utilizzabili soltanto le celle delle marche Hipower e Gaia. Enea si è occupata dell'approvvigionamento di tali batterie da destinare alla sperimentazione per la conferma delle prestazioni suddette: la soluzione Gaia si è rivelata non percorribile causa l'alto costo delle celle (in relazione alla quantità richiesta), mentre le celle Hipower sono in fase di consegna.

6. Batterie litio-ioni per applicazioni navali.

L'argomento è trattato in dettaglio nel report "Uso di batterie al litio in applicazioni SLI e navali" prodotto dall'Università di Pisa. In questo paragrafo si riporta una sintesi dell'argomento, rimandando al documento suddetto per la trattazione dettagliata.

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 batterie agli ioni di litio, che garantirebbero un risparmio di peso e volume, nonché una maggior vita in cicli.

Nei natanti da diporto (unità con lunghezza fino a 10 m) 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 imbarcazioni (lunghezza rispettivamente da 10 a 24m) e navi da diporto (lunghezza oltre 24m) si utilizzano tecnologie ermetiche e senza manutenzione, quali GEL e AGM.

Le tensioni nominali utilizzate sono 12V e 24V, quest'ultimo soprattutto nelle categorie imbarcazioni e navi da diporto.

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.

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.

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, per cui si prestano ad essere impiegate anche nelle suddette applicazioni navali.

A conclusione dell'argomento, sono stati osservati gli effetti in termini di ingombro e di peso conseguenti alla sostituzione delle batterie al piombo con quelle al litio ferro fosfato nei natanti da diporto e in un'imbarcazione tipo di circa 36m fuori tutto. Nel caso di un gommone medio si è calcolata 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%. Nel caso di un natante da diporto cabinato si è calcolata una diminuzione dell'ingombro delle batterie di circa il 35% e una diminuzione della potenza alla velocità massima di circa l'1,25%. Nel caso di navi da diporto si è calcolata 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%.

7. Generalità sulle batterie litio ioni per trazione.

L'argomento è trattato in dettaglio nel report "Uso di batterie al litio in applicazioni SLI e navali" prodotto dall'Università di Pisa. In questo paragrafo si riporta una sintesi dell'argomento, rimandando al documento suddetto per la trattazione dettagliata.

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. 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. Per le applicazioni in veicoli a propulsione elettrica, ove un parametro fondamentale è costituito dall'energia accumulata per unità di massa e di volume del sistema di accumulo, tale rapporto assume valori elevati. Per i veicoli ibridi invece non è possibile tracciare una considerazione di tipo generale sulla prevalenza del parametro di potenza o energia specifica: 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, ove occorrerà utilizzare batterie orientate alla potenza.

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. Eventuali moduli standard utilizzati per raggiungere la tensione tipica dell'applicazione mediante combinazioni serie-parallelo, devono avere tensioni massime di funzionamento che siano sottomultipli interi di 400V e 800V rispettivamente.

Inoltre, 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: 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.

Infine, il costruttore di veicoli ibridi è interessato alla durata di vita per cicli poco profondi intorno ad un livello di carica intermedio, ad es. scariche di $\pm 5\%$ intorno a un livello di SOC variabile fra 40% e 60% ed è però sostanzialmente impossibile reperire questo tipo di dati. A differenza dei veicoli a propulsione ibrida, in quelli puramente elettrici le batterie vengono normalmente scaricate con cicli profondi.

7.1 Batterie litio-ioni per la propulsione ibrida.

Alcune chimiche ed alcuni modelli di batterie al litio, caratterizzate da elevata potenza massica e volumica, hanno ricevuto un impulso formidabile per applicazioni nel campo della propulsione ibrida, ove si richiede un'autonomia molto limitata in modalità puramente elettrica a dispetto di alte potenze per brevi periodi di tempo. I veicoli a propulsione ibrida hanno nel sistema di accumulo un elemento cruciale, che può determinarne il successo o l'insuccesso: il sistema d'accumulo quindi non è più una sorgente ausiliaria di energia, ma diviene una sorgente fondamentale.

Da un'analisi dei veicoli presenti sul mercato, e da interviste dei costruttori, è risultato che il costruttore di veicolo a propulsione ibrida dedica grande impegno alla progettazione del proprio sistema di accumulo e male accetterebbe la presenza di moduli standard che, per quanto utili in quanto creano favorevoli economie di scala, inevitabilmente limitano la libertà del progettista. La molteplicità di situazioni, in funzione delle diverse tipologie di ibridi, dal micro ibrido fino al range-extender, e delle diverse taglie di veicoli, dal veicolo a due ruote all'autobus, ha condotto a rinunciare all'idea di proporre degli standard, anche perché la complessità della fase di sviluppo di un ibrido ne restringe le possibilità di applicazione alla grande e media industria, che è in grado di stringere intese ad hoc con i produttori di batterie.

7.2 Batteri litio-ioni per la propulsione elettrica pura.

Le batterie al Litio hanno ricevuto un impulso formidabile per applicazioni nel campo della propulsione elettrica, per le loro caratteristiche di elevata energia massica e volumica.

Alti valori di energia massica e volumica sono fondamentali per il successo di veicoli a propulsione elettrica con alimentazione esclusivamente a batteria, e per i veicoli elettrici di tipo plug-in.

Come per i veicoli ibridi, anche per quelli a propulsione elettrica il sistema di accumulo costituisce un elemento cruciale, che può determinarne il successo o l'insuccesso.

Nel caso di tali veicoli, il sistema di accumulo non è più una sorgente ausiliaria di energia, ma diviene addirittura l'unica sorgente di alimentazione.

Anche se per certi aspetti la problematica della standardizzazione di sistemi d'accumulo riscontrata per la propulsione ibrida si ritrova anche nella propulsione elettrica pura, in questo caso è stato comunque possibile individuare delle applicazioni nelle quali ha senso focalizzare la valutazione della standardizzazione dei moduli. Nel campo della propulsione elettrica "pura", a batteria, infatti, opera un pluralità di soggetti piccoli e medi che non sono in grado di stringere intese con i produttori di batterie, e che pertanto possono trarre beneficio dal presente studio.

Per tale mercato si è ritenuto di poter utilizzare la stessa tipologia di chimica prescelta per le batterie ausiliarie (ferro-fosfato) in virtù della sua sicurezza ed economicità rispetto alle batterie al litio di altre tipologie ed i vantaggi, in termini di riduzione di peso e volume, rispetto alle batterie al piombo.

Una specifica menzione merita l'aspetto costi della tecnologia ferro fosfato. La letteratura è ambigua a riguardo: esistono articoli che riportano le batterie di tale tecnologia come costose, altri invece mostrano un certo allineamento dei costi rispetto alle batterie di altre tecnologie ed altri ancora che le caratterizzano come economiche. Nell'esperienza d'acquisto diretta, riassunta nella tabella che segue, tale tecnologia è quella a cui è corrisposto il costo minore.

Storico degli acquisti recenti di batterie litio-ione					
Livello	Chimica	Caratteristiche	Costo per kWh	Data acquisto	Note
modulo	NCM	86,4V - 40Ah	699 €	01-2011	
sistema	NCM	48V - 20Ah	1656 €	06-2010	Compreso BMS
modulo	LFP	12V - 100Ah	889 €	06-2010	Compreso BMS
modulo	NCM	86,4V - 100Ah	600 €	01-2011	
cella	LFP	3,2V - 30/60/100Ah	276 €	05-2011	

Tabella 2 – Storico degli acquisti recenti di batterie litio-ione

Ad ulteriore integrazione di quanto sopra, si riporta un'altra tabella, in cui sono effettuate valutazioni di costo di vari modelli di batteria, differenti per tecnologia e fornitori. I costi sono relativi al 2010, ma la tabella si ritiene comunque utile a livello di concetto.

Confronto costi di batterie litio-ioni di varie tecnologie					
Caratteristiche		Costo	Costo unitario	Chimica	Fornitore
V	AH	€	€/kWh		
3.7	1.8	3.18	477.4775	LCO	K
3.2	0.6	7.74	4031.25	LFP	K
3.7	1.95	10.32	1430.353	?	P
3.2	1.4	4.76	1062.5	LFP	K
3.2	1.25	6.34	1585	LFP	K
3.7	2	6.15	831.0811	LCO	K
3.3	2.3	14.55	1916.996	LFP	A
3.2	3	7.93	826.0417	LFP	K
3.2	3.2	9.13	891.6016	LFP	K
3.2	2.5	10.32	1290	LFP	K
3.6	50	129.26	718.1111	LCO	T
3.2	40	53.99	421.7969	LFP	T
12.8	16	197.68	965.2344	LFP	K
3.2	50	98.44	615.25	LFP	B
12	10	198.48	1654	LFP	L
3.6	90	232.66	718.0864	LCO	T
3.2	60	80.98	421.7708	LFP	T
3.74	100	528.74	1413.743	NMC	O
3.6	100	258.52	718.1111	LCO	T
3.2	90	121.47	421.7708	LFP	T
3.2	100	178.63	558.2188	LFP	B
12	20	373.13	1554.708	LFP	L
24	10	396.95	1653.958	LFP	L
3.6	200	517.03	718.0972	LCO	T
3.2	160	215.94	421.7578	LFP	T
12	30	547.79	1521.639	LFP	L
36	10	595.43	1653.972	LFP	L
3.2	200	317.56	496.1875	LFP	T
12.8	42	682.76	1270.015	LFP	V
3.2	200	364.4	569.375	LFP	B
12	40	722.45	1505.104	LFP	L
24	20	746.27	1554.729	LFP	L
48	10	793.9	1653.958	LFP	L
12	60	1095.59	1521.653	LFP	L
24	30	1095.59	1521.653	LFP	L
36	20	1119.4	1554.722	LFP	L
72	10	1190.85	1653.958	LFP	L

3.2	400	635.12	496.1875	LFP	T
3.6	600	2326.63	1077.144	LCO	T
19.2	68	1536.2	1176.624	LFP	V
12.8	100	1508.42	1178.453	LFP	V
12	80	1444.9	1505.104	LFP	L
24	40	1444.9	1505.104	LFP	L
48	20	1492.54	1554.729	LFP	L
96	10	1587.81	1653.969	LFP	L
12.8	122	1841.85	1179.463	LFP	V
108	10	1786.28	1653.963	LFP	L
36	30	1643.38	1521.648	LFP	L
12	120	2167.35	1505.104	LFP	L
144	10	2381.71	1653.965	LFP	L
24	60	2191.17	1521.646	LFP	L
36	40	2167.35	1505.104	LFP	L
48	30	2191.17	1521.646	LFP	L
3.2	800	1587.81	620.2383	LFP	T

Tabella 3 – Confronto costi di batterie litio ioni di varie tecnologie.

Non avendo chiesto l'autorizzazione per la pubblicazione dei dati ai vari fornitori, ciascuno di essi è stato individuato con una lettera. Da un'analisi dei valori riportati in tabella risultano i seguenti costi medi:

- costo medio LCO 751.1583 €/kWh
- costo medio LFP 1300.484 €/kWh
- costo medio NMC 1422.048 €/kWh
- costo medio LCO fornitore T 807.8657 €/kWh
- costo medio LFP fornitore T 471.3871 €/kWh

Con riferimento al costo mediato tra tutti i fornitori, la tecnologia ferro fosfato si collocherebbe quindi in una posizione intermedia. Se però ci si limita a considerare i modelli del medesimo fornitore identificato con la lettera T, che fornisce diverse tipologie di chimica ed i cui costi sono riferiti sicuramente solo alla cella (tra i valori in tabella, alcuni si riferiscono a sistemi completi di elettronica, e.g. i sistemi a 12.8 e superiore) il confronto appare più corretto in quanto avviene realmente a parità di condizioni: in tale ambito la tecnologia ferro fosfato si colloca come quella più economica. Anche considerando l'intera tabella, il costo assoluto più basso è per una batteria con la tecnologia ferro fosfato (421 €/kWh).

Un'ultima considerazione può essere fatta riportando una stima dei costi per le varie tecnologie, riferiti alla potenza [7]. Anche da questi ultimi dati la tecnologia ferro fosfato risulta essere vantaggiosa. Si tenga inoltre presente che detta tecnologia è tuttora in fase di sviluppo, quindi suscettibile di una riduzione dei costi.

Stima dei costi per kW per varie tipologie di chimica	
Chimica	Costo €/kW
NCA	40
LMO/LTO	40
LMO/C	40
LFP	30

Tabella 4 – Stima dei costi riferiti alla potenza, per varie tipologie di chimica

Effettuata la scelta della tecnologia, occorre decidere le taglie da assegnare ai vari moduli. Oltre la piccola taglia (30 Ah), è stato necessario considerare anche una taglia media (60 Ah) ed una grande (90 Ah), accoppiabili ulteriormente in parallelo per realizzare sistemi batterie da 120 e 180 Ah.

8. Il mercato delle macchine “off-road”.

L'argomento è trattato in dettaglio nel report "Possibilità di estensione dell'elettrificazione al mercato dei veicoli off-road" prodotto da ENEA ed allegato al presente elaborato. In questo paragrafo si riporta una sintesi dell'argomento, rimandando al documento suddetto per la trattazione dettagliata.

Esiste un gran numero di aziende, medio/piccole, operanti nei settori delle macchine per cantiere edile, per il giardinaggio, per la pulizia delle strade, per il movimento terra, macchine per orticoltura e serre agricole, che utilizzano per i mezzi di loro produzione motorizzazioni diesel ed a benzina.

Il confronto tra le attuali motorizzazioni diesel-elettriche per veicoli industriali/macchine operatrici, evidenzia la superiorità dell'elettrico sia dal punto di vista dei consumi energetici "dal pozzo alla ruota" che dal punto di vista dell'impatto globale (emissioni di CO₂).

L'estensione dell'elettrificazione ai settori "non stradali", con una doppia valenza, ambientale ed energetica, potrebbe quindi aprire spazi di mercato non trascurabili, con potenzialità equivalenti all'immissione sul mercato di decine di migliaia di auto elettriche all'anno.

Per il complesso di ragioni sopra indicate, si è effettuato uno studio tecnico-economico per la valutazione del potenziale mercato dei mezzi off-road in versione elettrica.

Come primo passo della ricerca sono stati individuati, già disponibili sul mercato, svariati tipi di macchine azionate elettricamente. Successivamente, sono stati scelti i settori merceologici potenzialmente interessanti per lo studio: macchine per cantiere edile, macchine per il giardinaggio, macchine per la pulizia delle strade, macchine agricole, macchine movimento terra, macchine per orticoltura e serre, macchine per la neve. Lo studio è stato concentrato sulle motorizzazioni, tipicamente di potenza medio/bassa, potenzialmente sostituibili con motorizzazioni "a batteria" di tipo innovativo. Sono state quindi escluse le motorizzazioni con potenze elevate o cicli di lavoro tali da poter essere affrontate solo con motorizzazioni ibride o con dei costi troppo elevati per la grande quantità di batterie al litio necessarie al loro funzionamento. Nell'ambito delle motorizzazioni scelte è stato prodotto un elenco di mezzi (64 in tutto) per ciascuno dei quali è stato dimensionato preliminarmente (in kWh e kW) il pacco batterie ritenuto adatto alla particolare applicazione.

Il risultato dello studio, rappresentato schematicamente dalla figura sotto riportata, è stata l'individuazione di due taglie di moduli, da 120 Ah e da 180 Ah, e di tre livelli di tensione, 48, 96 e 192 V, che, diversamente combinati, soddisfano tutte le esigenze dell'elettrificazione dei mezzi.

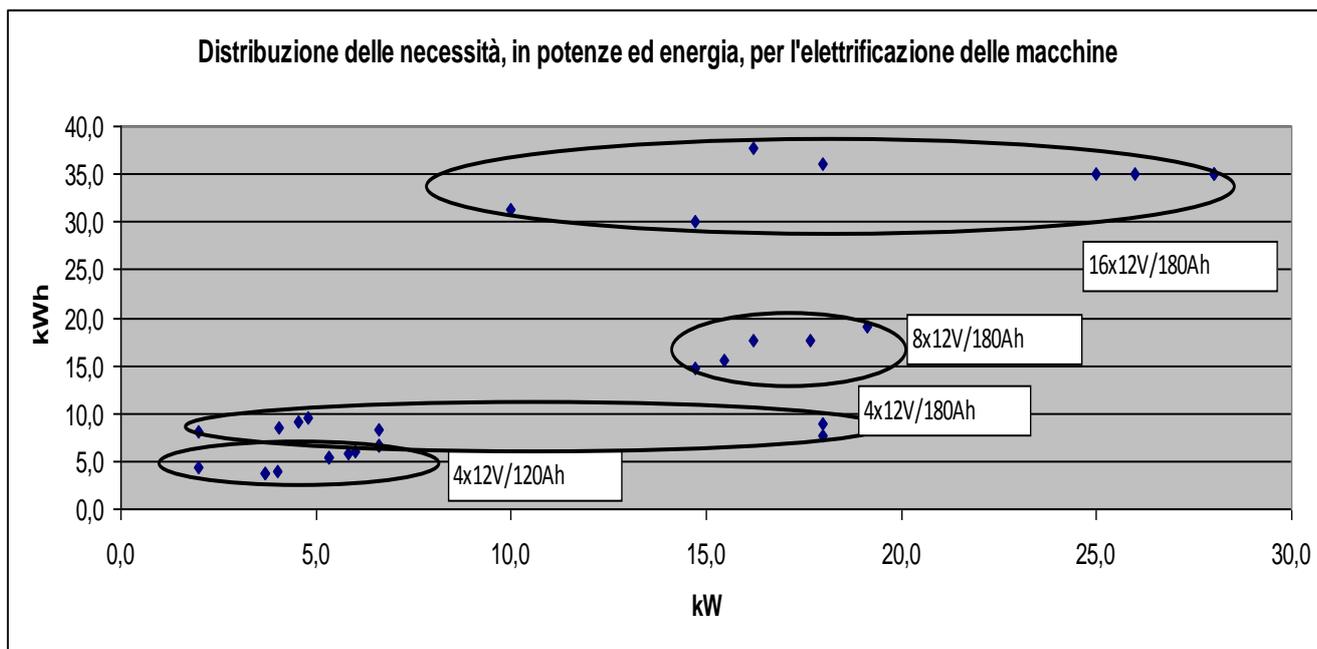


Figura 28 – Distribuzione di potenza ed energia per l'elettificazione delle macchine

Conoscendo i dati attuali di vendite (gentilmente forniti dalle associazioni di costruttori o dalle aziende operanti nel settore) annuali dei mezzi in Italia, la tipologia ed il numero delle batterie al litio necessarie al funzionamento di ogni singola macchina, nell'ipotesi che la produzione di mezzi azionati elettricamente sia solo il 10% del mercato totale, è stato ricavato quale è il potenziale volume di vendita al 2020 per i diversi settori, espresso in kWh e riportato in figura:

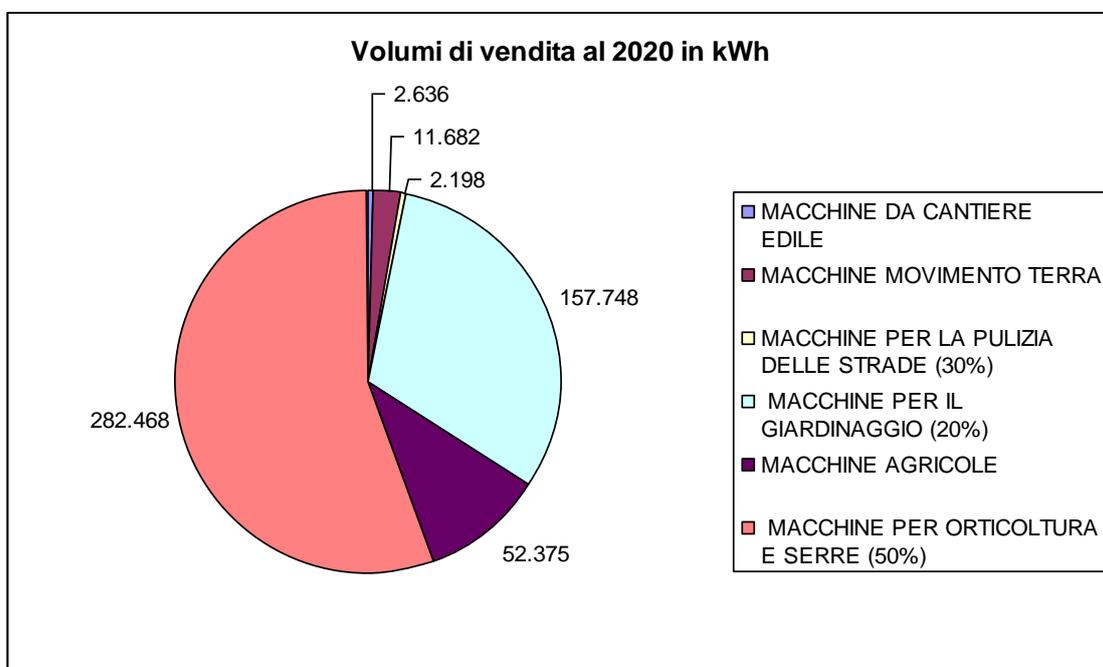


Figura 29 – Potenziale volume di vendite al 2020 per diversi settori

Al costo unitario di 400 €/KWh, previsto come obiettivo di costo per le batterie di trazione, questi volumi corrispondono ad un fatturato di oltre 200 ML €. In termini di autovetture elettriche equivalenti, ponendo in 25 kWh il contenuto energetico della batteria di

un'autovettura di classe media, il mercato off-road al 2020 varrebbe quindi circa 20.000 autovetture elettriche. Considerato che a quella data si stima una penetrazione del puro elettrico sul mercato dell'auto nell'ordine del 3-4%, il mercato parallelo così delineato vale tra il 25 ed il 30% del mercato automobilistico.

Si sottolinea che in occasione dei vari contatti con le aziende costruttrici si è riscontrato che i principali problemi che si contrappongono alla massiccia diffusione dei veicoli elettrici sono l'elevato costo iniziale delle macchine/mezzi causato dall'elevato costo delle batterie al litio e la limitata autonomia delle macchine azionate elettricamente. Un valido argomento per conseguire la diminuzione dei prezzi è rappresentato dalla modularità: l'adozione di elementi modulari standard, consentirebbe ad un ipotetico operatore economico di poter soddisfare le esigenze delle varie applicazioni gestendo un medesimo prodotto e ciò si tradurrebbe in alti volumi di produzione, o acquisto, e quindi in un contenimento dei prezzi. La modularità, associata all'impiego di moduli di piccola taglia e ad un insieme di infrastrutture di ricarica, permetterebbe anche di conseguire una riduzione del peso del pacco batterie, altro fattore limitante, in quanto peggiorativo dei consumi chilometrici.

9. Problematiche di progettazione modulo 12V d'avviamento

Per la progettazione del modulo standard, SLI che per trazione occorrerà tenere in conto tutte le tematiche evidenziate per questo tipo di applicazione:

1) il problema della tensione e dell'equalizzazione. E' stato osservato come le uniche batterie al litio oggi sul mercato con abbondanza di fornitura (escludendo quindi le TiLi) sono le Litio-Ferro-Fosforo, comunemente indicate come LFP. I moduli conterranno quindi 4 celle LFP in serie. E' stato inoltre osservato come la caratteristica di funzionare per lunghi periodi in tampone rende particolarmente auspicabile l'adozione di un sistema di equalizzazione attiva, per ragioni di efficienza energetica, anche tenuto conto che esigenze di economicità del modulo portano ad evitare una preselezione rigorosa per uniformità delle celle da disporre in serie.

2) il problema della CCA. Le batterie LFP si presentano con un rapporto potenza massima/energia massima abbastanza favorevole all'applicazione SLI, con rapporto fra la corrente di scarica ad un minuto ed un'ora almeno pari a 5: $I_{1m}/I_{1h} \geq 5$. Per l'avviamento di motori con correnti di spunto molto elevati in taluni casi si utilizzano batterie ad alta potenza in grado di realizzare rapporti I_{1m}/I_{1h} superiori a 10. Per queste applicazioni risulta necessario sovradimensionare la batteria al litio, ad esempio adottando una capacità nominale doppia rispetto a quella strettamente necessaria per le scariche lente

3) il problema della calendar life. Le batterie LFP presentano una vita in cicli tipicamente abbondantemente superiore a quella delle batterie al piombo. Per poter sfruttare questo vantaggio, però, è opportuno che la calendar life di a almeno pari a 8 anni, in modo da utilizzare un'unica batteria per l'intera vita del veicolo, invece di prevedere una sostituzione dopo 4 anni. Al momento i costruttori non forniscono informazioni adeguate sulla calendar life, forse anche per la giovane età della tecnologia LFP, ma è un dato che risulterà importante nella valutazione della competitività economica del modulo

4) il problema della gestione termica. La gestione termica delle batterie al litio è alquanto più delicato di quello delle batterie al piombo. Normalmente i costruttori raccomandano che le celle non superino in alcun momento la temperatura di 60°C, per la possibilità di innescarsi di problemi di sicurezza. Questo potrebbe implicare la necessità di raffreddamento a liquido per veicoli che operino in ambienti particolarmente caldi (temperatura ambiente di 40°C o più), e impone di valutare attentamente l'ubicazione del modulo nel veicolo, lontano quindi da importanti fonti di calore quale il motore a combustione interna

5) Scelta della taglia. Notevoli vantaggi si possono ottenere dalla progettazione di moduli standard di taglia assegnata. E' ben noto che le batterie SLI convenzionali sono reperibili sul mercato con valori di capacità nominali (taglie) molto differenti le une dalle altre, e questo non comporta particolari limitazioni alla loro diffusione. Occorre però notare come la progettazione dei moduli al litio sia più complessa, per le suddette necessità di monitoraggio, equalizzazione e condizionamento termico, e pertanto una limitazione del numero di taglie disponibili comporterebbe sicuramente un miglioramento della loro competitività. Dall'analisi delle celle LFP esistenti sul mercato, nonché delle esigenze di ambito automobilistico appare molto interessante la possibilità di realizzare una o due taglie standard. Il valore della taglia più piccola potrebbe essere di 30 Ah, per la quale esistono celle LFP sul mercato, che consente di alimentare le autovetture più piccole e, connettendone in parallelo 2 o 3, le autovetture più grandi. Ad essa si potrebbe eventualmente associare una taglia superiore, ad es. da 100 Ah, per la quale esistono celle LFP sul mercato, per l'alimentazione di veicoli di grossa taglia.

10. Problematiche di progettazione modulo 12 V per applicazioni navali

Le applicazioni navali sono di tipo SLI, per piccole imbarcazioni, o di alimentazione di carichi ausiliari, per altre imbarcazioni. Le tematiche progettuali sono pertanto simili, ma non identiche a quelle per applicazioni SLI, e vengono qui di seguito riassunte.

1) il problema della tensione e dell'equalizzazione. Anche in campo navale le tensioni nominali utilizzate sono 12V o 14V, con l'implicita considerazione che quando le batterie vengono mantenute in tampone la tensione in realtà sarà prossima al valore di 14V, quindi ampiamente superiore a quello nominale. Si possono pertanto ripetere le osservazioni riportate per batterie SLI. Sono quindi da realizzare moduli da 4 celle LFP, dotati di monitoraggio di temperatura e delle tensioni di cella, con equalizzazione della carica, preferibilmente di tipo attivo.

2) il problema della CCA. Questo problema sussiste solo nei casi di piccolissime imbarcazioni in cui la corrente per l'avviamento motori è molto superiore rispetto alla corrente nominale della batteria.

3) nei casi in cui vengano utilizzate batterie separate per l'alimentazione di carichi ausiliari ovviamente questo problema non sussiste, come potrebbe non essere significativo in batterie per le quali è richiesta una capacità elevata, rispetto alla quale le correnti di avviamento del motore di propulsione non superano le 4-5 volte la corrente nominale di batteria

4) il problema della gestione termica. La gestione termica delle batterie al litio è delicata anche per applicazioni navali, nelle quali è prassi comune dimensionare i sistemi elettrici per temperature ambiente di 45°C (v. ad es. le norme RINA). Normalmente i costruttori raccomandano che le celle non superino in alcun momento la temperatura di 60 °C, per la possibilità di innescarsi di problemi di sicurezza. Questo potrebbe implicare la necessità di raffreddamento a liquido e impone di valutare attentamente l'ubicazione del modulo nell'imbarcazione, lontano quindi da importanti fonti di calore.

5) Scelta della taglia. Se si focalizza l'attenzione su imbarcazioni da diporto piccole o medie, le taglie considerate per applicazioni SLI (30 Ah e 100Ah) appaiono del tutto adeguate anche per applicazioni navali. In queste ultime aumenti di energia si possono ottenere non solo mediante collegamenti in parallelo, ma anche considerando connessioni in serie per le applicazioni di più alta energia per le quali già oggi viene utilizzata una tensione nominale di 24 V.

11. Progettazione preliminare modulo 12V per trazione e relativo Battery Management System

Il risultato di soddisfare tutte le esigenze dell'elettrificazione dei veicoli off-road trattati nel paragrafo 8.2 può essere raggiunto mediante la realizzazione di tre moduli da 12 – 14 Vn, uno di piccola taglia (30 Ah), uno di media taglia (60 Ah) ed uno di grande taglia (90 Ah), di cui questo capitolo riporta la specifica tecnica preliminare.

La presente specifica ha lo scopo di raccogliere tutte le principali informazioni (requisiti, obiettivi, uso, installazione e vincoli ambientali) per realizzare la progettazione preliminare e successivamente la realizzazione di un prototipo da laboratorio del modulo batterie. Dopo l'esecuzione di alcuni test sul prototipo, sarà possibile un documento di specifica finale come base per la realizzazione del modulo definitivo (come attività dell'anno successivo della RdS).

11.1 Standard applicabili.

Tanto i prototipi, quanto i prodotti finali, saranno realizzati in accordo ai principali standard internazionali relativi alla sicurezza d'impiego di sistemi d'accumulo elettrici nei veicoli ed alla loro funzionalità. La Tabella che segue riassume i principali standard considerati.

Principali standards relativi alla sicurezza d'impiego di sistemi d'accumulo elettrici nei veicoli	
Nome	Titolo
ISO 6469-1	Safety specifications – Part 1: On-board electrical energy storage
ISO 6469-2	Safety specifications – Part 2: Vehicle functional safety
ISO 6469-3	Safety specifications – Part 3: Protection of persons against electric hazards

Tabella 5 – Standards relativi alla sicurezza d'impiego di sistemi d'accumulo elettrici nei veicoli

11.2 Descrizione del modulo.

Il modulo deve includere:

- le celle elementari e relative connessioni,
- il Battery Management System (BMS) di modulo, di tipo "built-in" costituito da sistema elettronico di monitoraggio dello stato di carica, corrente, tensione totale, tensione e temperatura delle singole celle, sistema elettronico di bilanciamento delle celle, sistema di comunicazione dei dati,
- sistema di raffreddamento, integrato nell'architettura del modulo,
- interfaccia elettrica di potenza, costituita da connettori di potenza IP57, rilevazione isolamento (gestita dal BMS di modulo), dispositivi elettrici addizionali (fusibili rapidi per entrambi i poli),
- involucro, inclusi supporti ed altri dispositivi per il trasporto (cordoni di sollevamento) e l'installazione, resistente alla polvere ed all'acqua secondo il grado IP56, in materiale ritardante di fiamma.

Nella figura che segue, viene mostrato uno schema del modulo, con i suoi componenti principali e le interfacce di comunicazione verso il BMS di sistema.

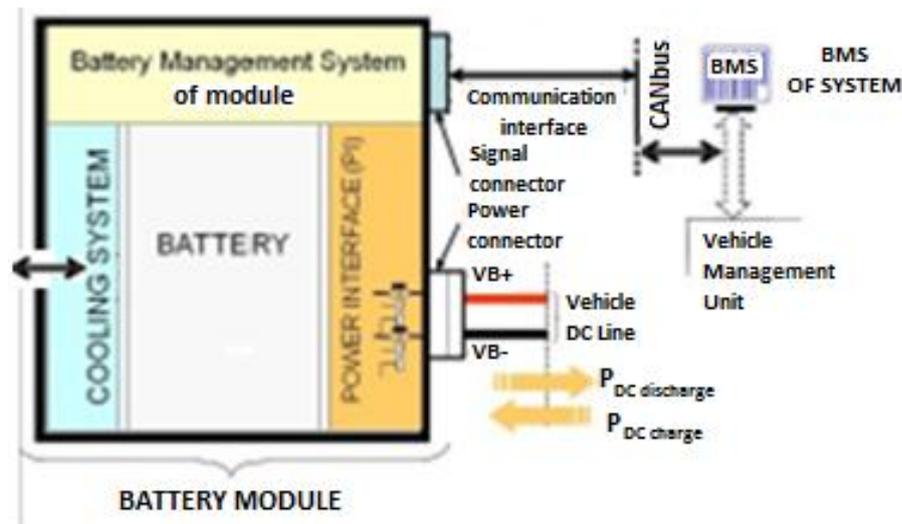


Figura 30 – Schema del modulo

11.3 Modi di esercizio

Il modulo dovrà avere i seguenti modi d'uso:

- fornire l'energia per la trazione,
- recuperare l'energia durante le fasi di frenatura.

11.4 Requisiti funzionali ed elettrici

Requisiti di potenza

- potenza di picco in scarica (10 secondi): circa 2 kW (piccola taglia), 4 kW (taglia media), 7 kW (taglia grande) , a 25°C, fino a SOC 20%,
- valore medio di potenza durante le fasi di carica – scarica: circa 0,5 kW (taglia piccola), 0,75 kW (taglia media), 1,5 kW (taglia grande).

Campo di tensione

- minima tensione durante la scarica: 10,0 V.
- massima tensione durante la carica: 15,4 V.

Autoscarica

- l'autoscarica consentita per mese sarà minore o uguale al 3% della capacità nominale.

11.5 Requisiti di tipo meccanico

Il modulo deve essere realizzato in un contenitore unico e la sua installazione a bordo del veicolo dovrebbe poter avvenire senza richiedere pesanti modifiche meccaniche. Come riferimento per il modulo si è assunta la configurazione attuale delle batterie al piombo, pertanto le dimensioni massime complessive (tutto incluso) dovrebbero possibilmente essere:

- lunghezza: ≤ 260 mm,
- larghezza: ≤ 173 mm,
- altezza: ≤ 225 mm,
- peso: ≤ 16 kg (grande taglia).

11.6 Requisiti per il sistema di raffreddamento.

Il prototipo verrà realizzato senza sistema di raffreddamento. La sperimentazione da eseguire su di esso (attività del prossimo anno) chiarirà se è necessario un sistema di raffreddamento ed, in caso affermativo, di che tipo deve essere (aria forzata o liquido).

Per verificare la necessità di un sistema di raffreddamento, e per dimensionarlo correttamente in caso fosse necessario, si assume come riferimento il profilo riportato nella norma CEI EN 61982-3, ed illustrato in Figura , avente come scopo la misura dei parametri caratteristici delle batterie in una condizione di lavoro propria di un veicolo puramente elettrico. Il ciclo di prova da effettuare è costituito da gradini di scarica e carica a diversa potenza e viene ripetuto fino al raggiungimento della tensione di fine scarica.

I set-up di potenza indicati nella Figura sono validi per una batteria standard da 40 kWh di energia alla potenza nominale, adatta per alimentare un veicolo puramente elettrico con un peso di circa 2000 kg, per un range di percorrenza di 250 km. Per effettuare prove su batterie più piccole si possono dividere tali valori di potenza per un opportuno fattore di scala (f_s), pari al rapporto tra l'energia nominale della batteria standard e quella della batteria effettivamente in prova (ad esempio se la batteria in prova ha una energia nominale pari a 10 kWh si avrà un f_s pari a 4).

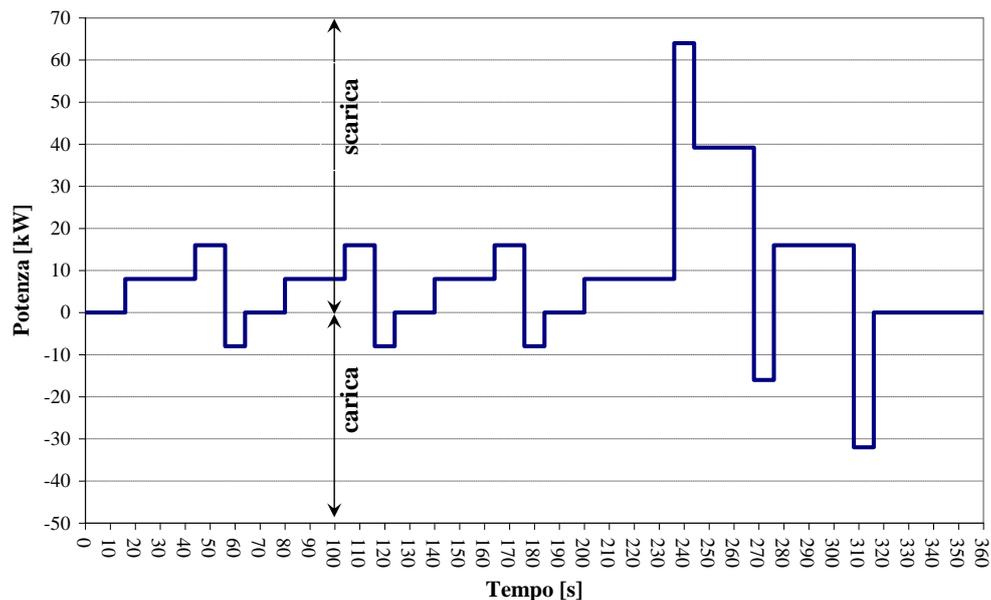


Figura 31 - Ciclo da ripetere nella prova di sollecitazione dinamica

La tabella seguente riporta i set-up di potenza e la durata dei singoli gradini che costituiscono il ciclo di prova.

Gradino No.	Durata [s]	Potenza [kW]	Gradino No.	Durata [s]	Potenza [kW]
1	16	0	11	12	16/fs
2	28	8/fs	12	8	-8/fs
3	12	16/fs	13	16	0
4	8	-8/fs	14	36	8/fs
5	16	0	15	8	64/fs
6	24	8/fs	16	24	39,2/fs
7	12	16/fs	17	8	-16/fs
8	8	-8/fs	18	32	16/fs
9	16	0	19	8	-32/fs
10	24	8/fs	20	44	0

Tabella 6 - Elenco dei valori di potenza (divisi per il fattore di scala) e durata dei singoli gradini del ciclo della prova di sollecitazione dinamica (corrente di scarica positiva, corrente di carica negativa)

11.7 Vita

Vita di calendario: deve essere paragonabile a quella delle attuali batterie al piombo (anche per motivi psicologici del potenziale acquirente), quindi 6 – 8 anni.

Vita espressa come numero di cicli corrispondenti alla vita di calendario: la definizione di questa grandezza richiede la conoscenza del ciclo di lavoro tipico dei veicoli off-road. In mancanza di tale informazione, si assume temporaneamente il ciclo ECE riportato in figura (durata 1200 secondi e lunghezza 11,67 km). Considerando una percorrenza media annua di 15.000 km, il numero di cicli che corrisponde ai 6 – 8 anni della vita di calendario, si traduce in 7.500 – 10.000 cicli tipo ECE. Il ciclo di prova da effettuare è costituito da gradini di scarica e carica a diversa potenza e viene ripetuto fino al raggiungimento della tensione di fine scarica. Al termine di questa fase occorre ricaricare la batteria secondo la procedura di carica fondo. I set-up di potenza indicati nella Figura sono validi per una batteria standard da 15 kWh di energia alla potenza nominale, in grado di erogare 250 W/kg con un SOC del 40%, adatta per alimentare un veicolo puramente elettrico con un peso di circa 1150 kg, per un range di percorrenza di 113 km. Per effettuare prove su batterie più piccole si possono dividere tali valori di potenza per un opportuno fattore di scala (fs), pari al rapporto tra l'energia nominale della batteria standard e quella della batteria effettivamente in prova (ad esempio se la batteria in prova ha una energia nominale pari a 5 kWh si avrà un fs pari a 3).

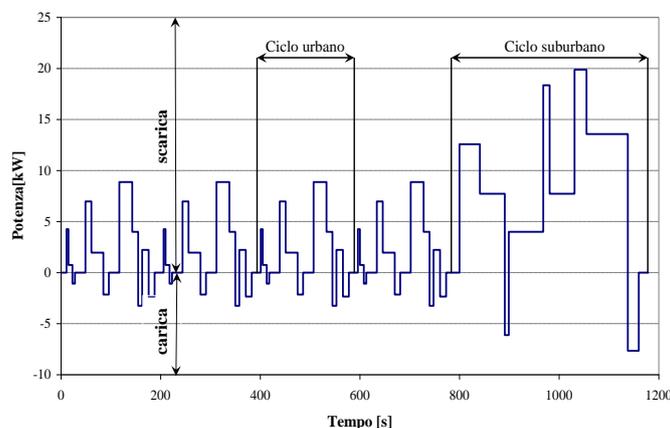


Figura 32 - Ciclo da ripetere nella prova bimodale alta potenza

La tabella seguente riporta i set-up di potenza e la durata dei singoli gradini che costituiscono il ciclo di prova.

ECE Ciclo Urbano			EUDC Ciclo Suburbano		
Gradino No.	Durata [s]	Potenza [W]	Gradino No.	Durata [s]	Potenza [W]
1	11	0	1	20	0
2	4	4250/fs	2	41	12575/fs
3	8	750/fs	3	50	7725/fs
4	5	-1075/fs	4	8	-6125/fs
5	21	0	5	69	4000/fs
6	12	6975/fs	6	13	18350/fs
7	24	1950/fs	7	50	7725/fs
8	11	-2150/fs	8	24	19875/fs
9	21	0	9	83	13575/fs
10	26	8875/fs	10	22	-7650/fs
11	12	4000/fs	11	20	0
12	8	-3250/fs			
13	13	2225/fs			
14	12	-2350/fs			
15	7	0			

Tabella 7 - Elenco dei valori di corrente (divisi per il fattore di scala) e durata dei singoli gradini del ciclo di vita, convenzione dei generatori.

Sarà svolta una ulteriore verifica riguardo al ciclo di lavoro tipico per le macchine off-road e la durata della vita, espressa in numero di cicli, sarà ricalcolata.

11.8 Condizioni ambientali

- temperatura ambiente: $-20^{\circ}\text{C} \div +50^{\circ}\text{C}$,
- temperatura di esercizio: $-20^{\circ}\text{C} \div 55^{\circ}\text{C}$,
- umidità: $0 \div 100\%$.

11.9 Scelta della cella elementare e caratteristiche elettriche principali del modulo di piccola taglia.

Il modulo di piccola taglia può essere realizzato utilizzando come cella elementare il modello HP-PW-30Ah costruito dalla Shangdong Hipower New Energy Group Co. Ltd, di cui si riportano di seguito le caratteristiche principali:

Principali caratteristiche della cella per il modulo di piccola taglia		
<i>Specifica</i>	<i>Valore</i>	
Tensione [V]	3.20	
Capacità nominale [Ah]	30	
Dimensioni, terminali inclusi (L*W*H) [mm]	103 x 41 x 168	
Peso [kg]	1.15	
Terminali	M12	
Scarica @ +23 °C	Massima corrente continua [A]	90
	Picco @ 60 sec [A]	150
	Cut - off [V]	2.50
Carica @ +23 °C	Metodo di carica	CC/CV (3.65 V)
	Massima corrente di carica [A]	30
	Cut - off [V]	3.85

Tabella 8 - Principali caratteristiche della cella per il modulo di piccola taglia

Esso sarà costituito dalla connessione in serie di 4 celle elementari. Di conseguenza le caratteristiche principali del modulo diventano le seguenti:

Caratteristiche elettriche principali del modulo di piccola taglia		
<i>Specifica</i>	<i>Valore</i>	
Tensione [V]	12.80	
Capacità nominale [Ah]	30	
Dimensioni minime ³ (L*W*H) [mm]	103 x 164 x 168	
Peso ⁴ minimo [kg]	4.6	
Terminali	M12 nuts	
Energia specifica massima ⁵ [Wh/kg]	83	
Densità di energia massima ⁶ [Wh/l]	135	
Scarica @ +23 °C	Massima corrente continuativa [A]	90
	Picco @ 60 sec [A]	150
	Cut - off [V]	10
Carica @ +23 °C	Metodo di carica	CC/CV (14.6 V)
	Massima corrente continuativa [A]	30
	Cut - off [V]	15.4

Tabella 9 - Caratteristiche elettriche principali del modulo di piccola taglia

11.10 Scelta della cella elementare e caratteristiche elettriche principali del modulo di media taglia.

Il modulo di media taglia può essere realizzato utilizzando come cella elementare il modello HP-PW-60Ah costruito dalla Shangdong Hipower New Energy Group Co. Ltd, di cui si riportano di seguito le caratteristiche principali:

³ Le dimensioni effettive dipenderanno dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo, che saranno oggetto della progettazione definitiva.

⁴ Peso delle sole celle. Il peso effettivo dipenderà dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo, che saranno oggetto della progettazione definitiva, nonché dal case.

⁵ Il valore effettivo dell'energia specifica dipenderà anch'esso dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo.

⁶ Il valore effettivo dell'energia specifica dipenderà anch'esso dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo.

Principali caratteristiche della cella per il modulo di media taglia		
<i>Specifica</i>	<i>Valore</i>	
Tensione [V]	3.20	
Capacità nominale [Ah]	60	
Dimensioni, terminali inclusi (L*W*H) [mm]	114 x 61 x 203	
Peso [kg]	2.04	
Terminali	M6 bolts	
Scarica @ +23 °C	Massima corrente continuativa [A]	180
	Picco @ 60 sec [A]	300
	Cut - off [V]	2.50
Carica @ +23 °C	Metodo di carica	CC/CV (3.65 V)
	Massima corrente continuativa [A]	60
	Cut - off [V]	3.85

Tabella 10 - Principali caratteristiche della cella per il modulo di media taglia

Esso sarà costituito dalla connessione in serie di 4 celle elementari. Di conseguenza le caratteristiche principali del modulo diventano le seguenti:

Caratteristiche elettriche principali del modulo di media taglia		
<i>Specifica</i>	<i>Valore</i>	
Tensione [V]	12.80	
Capacità nominale [Ah]	60	
Dimensioni minime ⁷ (L*W*H) [mm]	114 x 244 x 203	
Peso ⁸ minimo [kg]	8.16	
Terminali	M6 bolts	
Energia specifica massima ⁹ [Wh/kg]	94	
Densità di energia massima ¹⁰ [Wh/l]	136	
Scarica @ +23 °C	Massima corrente continuativa [A]	180
	Picco @ 60 sec [A]	300
	Cut - off [V]	10
Carica @ +23 °C	Metodo di carica	CC/CV (14.6 V)
	Massima corrente continuativa [A]	60
	Cut - off [V]	15.4

Tabella 11 - Caratteristiche elettriche principali del modulo di media taglia

11.11 Scelta della cella elementare e caratteristiche elettriche principali del modulo di grande taglia.

Il modulo di grande taglia può essere realizzato utilizzando come cella elementare il modello HP-PW-100Ah (la capacità 90 Ah non è a catalogo) costruito dalla Shangdong Hipower New Energy Group Co. Ltd, di cui si riportano di seguito le caratteristiche principali:

⁷ Le dimensioni effettive dipenderanno dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo, che saranno oggetto della progettazione definitiva.

⁸ Peso delle sole celle. Il peso effettivo dipenderà dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo, che saranno oggetto della progettazione definitiva, nonché dal case.

⁹ Il valore effettivo dell'energia specifica dipenderà anch'esso dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo.

¹⁰ Il valore effettivo dell'energia specifica dipenderà anch'esso dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo.

Principali caratteristiche della cella per il modulo di grande taglia		
<i>Specifica</i>	<i>Valore</i>	
Tensione [V]	3.20	
Capacità nominale [Ah]	100	
Dimensioni, terminali inclusi (L*W*H) [mm]	163 x 51 x 278	
Peso [kg]	3.40	
Terminali	M8 bolts	
Scarica @ +23 °C	Massima corrente continuativa [A]	300
	Picco @ 60 sec [A]	500
	Cut - off [V]	2.50
Carica @ +23 °C	Metodo di carica	CC/CV (3.65 V)
	Massima corrente continuativa [A]	100
	Cut - off [V]	3.85

Tabella 12 - Principali caratteristiche della cella per il modulo di grande taglia

Esso sarà costituito dalla connessione in serie di 4 celle elementari. Di conseguenza le caratteristiche principali del modulo diventano le seguenti:

Caratteristiche elettriche principali del modulo di grande taglia		
<i>Specifica</i>	<i>Valore</i>	
Tensione [V]	12.80	
Capacità nominale [Ah]	100	
Dimensioni minime ¹¹ (L*W*H) [mm]	163 x 204 x 278	
Peso ¹² minimo [kg]	13.60	
Terminali	M8 bolts	
Energia specifica massima ¹³ [Wh/kg]	94	
Densità di energia massima ¹⁴ [Wh/l]	138	
Scarica @ +23 °C	Massima corrente continuativa [A]	300
	Picco @ 60 sec [A]	500
	Cut - off [V]	10
Carica @ +23 °C	Metodo di carica	CC/CV (14.6 V)
	Massima corrente continuativa [A]	100
	Cut - off [V]	15.4

Tabella 13 - Caratteristiche elettriche principali del modulo di grande taglia

¹¹ Le dimensioni effettive dipenderanno dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo, che saranno oggetto della progettazione definitiva.

¹² Peso delle sole celle. Il peso effettivo dipenderà dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo, che saranno oggetto della progettazione definitiva, nonché dal case.

¹³ Il valore effettivo dell'energia specifica dipenderà anch'esso dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo.

¹⁴ Il valore effettivo dell'energia specifica dipenderà anch'esso dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo.

12. Sistema d'accumulo modulare 48 V da laboratorio per mezzo fuoristrada da giardinaggio.

12.1 Generalità.

Come esempio dimostrativo della progettazione di moduli batterie precedentemente esposta, si è pensato di realizzare un sistema d'accumulo modulare. Lo studio relativo alla motorizzazione elettrica di apparecchiature e veicoli elettrici non stradali si presta ottimamente allo scopo, offrendo una notevole varietà di esempi. E' stato scelto il campo di lavoro 48V – 200Ah, corrispondente a $9 \div 10$ kWh, che ben si adatta a molte macchine della categoria "mezzi fuoristrada per giardinaggio", es. PK600 della Grillo SPA, Tigrecar e Tigrecar+ della Antonio Carraro SPA, l'ATX 200E della Alké. Di quest'ultimo, a titolo di esempio, si riporta un'immagine ed una tabella con le principali caratteristiche.



Figura 33 – Mezzo fuoristrada ATX 200E

Principali caratteristiche del mezzo fuoristrada ATX 200E		
Motore	Tipo	elettrico
	Tensione nominale di alimentazione [V _{DC}]	48
	Potenza [kW]	6
	Picco di potenza [kW]	17,5
Batterie	Quantità [n]	8
	Tensione nominale [V _{DC}]	6
	Capacità [Ah]	190
	Tempo di ricarica [h]	8
Peso a vuoto [kg]		820
Capacità di carico [kg]		530
Capacità di traino [kg]		2000
Velocità max [km/h]		30
Autonomia [km]		70

Tabella 14 - Principali caratteristiche mezzo fuoristrada da giardinaggio

Ipotizzando di voler studiare un sistema di alimentazione per un mezzo sì detto, esso potrebbe essere realizzato due gruppi di batterie agli ioni di litio, ciascuno da 48V – 100Ah (i due insieme ridanno il 48V – 200Ah riportato in precedenza nel testo e nella tabella). Tale sistema

può essere realizzato come sistema modulare, connettendo in serie 4 moduli da 100 Ah (in pratica, con riferimento alla classificazione definita nei capitoli precedenti, 4 moduli di grande taglia). Il sistema modulare verrà realizzato in una prima versione prototipale da laboratorio e, successivamente, nella versione definita. Nella versione finale, ciascun modulo sarà dotato del proprio BMS "built-in", a cui si aggiungerà il BMS di sistema. Il prototipo da laboratorio sarà realizzato mediante la connessione in serie di 4 moduli di grande taglia, anch'essi in versione prototipo, utilizzando come BMS uno di quelli commerciali di cui al capitolo 3.

Caratteristiche elettriche principali del sistema d'accumulo modulare 48 V per singola linea di trazione di mezzo fuoristrada da giardinaggio		
<i>Specificata</i>		<i>Valore</i>
Tensione nominale [V]		51.20
Capacità nominale [Ah]		100
Dimensioni minime (L*W*H) [mm]		652 x 204 x 278 ¹⁵
		326 x 408 x 278 ¹⁶
Peso ¹⁷ minimo [kg]		54.4
Terminali		M8
Energia specifica massima ¹⁸ [Wh/kg]		94
Densità di energia massima ¹⁹ [Wh/l]		138
Scarica @ +23 °C	Massima corrente continuativa [A]	300
	Picco @ 60 sec [A]	500
	Cut - off [V]	40
Carica @ +23 °C	Metodo di carica	CC/CV (58.4V)
	Massima corrente continuativa [A]	100
	Cut - off [V]	61.60

Tabella 15 - Caratteristiche elettriche principali del sistema d'accumulo modulare 48 V per singola linea di trazione di mezzo fuoristrada da giardinaggio

12.2 Valutazione di alcuni sistemi commerciali 48V.

Allo scopo di fornire degli spunti per l'emissione delle specifiche per il BMS di sistema per il pacco batterie del mezzo fuoristrada da giardinaggio, sono stati approvvigionati e testati due sistemi commerciali da 48 V: le prove di caratterizzazione sono state svolte con particolare riguardo all'analisi del comportamento del BMS durante le stesse. I sistemi considerati sono: un sistema batterie 48V 100Ah, ed un sistema batterie 48V 20Ah, sui quali sono state eseguite prove di capacità, resistenza interna, potenza ed OCV.

¹⁵ Ipotesi di moduli disposti in linea, a contatto l'uno con l'altro lungo la faccia di dimensioni 204 x 278 mm. In realtà la disposizione dei moduli a formare il sistema dovrà essere confermata dalla progettazione definitiva, in funzione delle necessità di smaltimento termico ed eventuali vincoli geometrici.

¹⁶ Ipotesi di moduli disposti secondo una matrice 2 x 2, a contatto l'uno con l'altro lungo la faccia 204 x 278 mm su ogni riga, e 163 x 278 su ogni colonna. Medesima osservazione fatta per la nota precedente.

¹⁷ Peso delle sole celle. Il peso effettivo dipenderà dal sistema di raffreddamento e dal BMS di modulo, che saranno oggetto della progettazione definitiva, nonché dal case.

¹⁸ Il valore effettivo dell'energia specifica dipenderà anch'esso dalla disposizione dei moduli.

¹⁹ Il valore effettivo dell'energia specifica dipenderà anch'esso dalla disposizione dei moduli.

12.2.1 Sistema 48 V – 100 Ah

Descrizione del sistema

Il sistema batterie 48 V 100 Ah è un sistema modulare ottenuto dalla connessione in serie di 4 moduli U24-12XP. Viste le sue caratteristiche elettriche e la modularità, questo sistema si colloca come soluzione preprototipale per il sistema della macchina fuoristrada da giardinaggio. La figura seguente illustra il modulo elementare e la tabella ne riporta le principali caratteristiche.



Figura 34 - Modulo 48V – 100Ah

Specifiche del modulo U24-12XP		
Tensione nominale		12.8 V
Capacità (C/5)		100 Ah
Dimensioni terminali inclusi (L x W x H)		260 x 173 x 225 mm
Peso		15.8 kg
Terminali (filettati femmina)		M8 x 1.25
Energia specifica		81 Wh/kg
Densità di energia		126 Wh/l
Scarica Standard @ +23 °C	Max corrente continuativa	150 A
	Max corrente pulsante 30 sec.	300 A
	Cut – off	10 V
Carica Standard @ +23 °C	Tensione	14.6 V
	Corrente raccomandata	50 A
	Tempo di carica	2.5 h
Resistenza interna		6 mΩ
Temperatura di esercizio		-10 °C ÷ +50 °C
Temperatura di storage		-40 °C ÷ +50 °C
Umidità di esercizio		5% ÷ 95%
Grado IP		56

Tabella 16 - Specifiche del modulo U24-12XP

Il modulo è realizzato in plastica ritardante la propagazione di fiamma, secondo le dimensioni standard delle batterie al piombo-acido del gruppo BCI numero 24 ma, a parità di dimensioni, offre una vita doppia ed un peso circa la metà rispetto alle corrispondenti batterie piombo-acido. Il modulo è costruito con celle litio-ioni di tecnologia ferro-fosfato, che assicura insuperabile sicurezza ed eccellente vita anche con scariche profonde, che si traduce in un costo più basso.



Figura 35 - Cella 3,2 V

Una singola cella elementare ha tensione nominale 3.2 V. Un singolo modulo è costituito da 4 gruppi di celle in serie. Un gruppo di celle è costituito da celle in parallelo con connessioni permanenti in piastre metalliche.

Ciascun modulo è una "batteria intelligente", cioè, oltre che svolgere la funzione di accumulo dell'energia, è dotato di una scheda elettronica (PCBA, printed circuit board assembly) ed associati componenti che realizzano il calcolo dello stato di carica del modulo, misura della corrente, misura della tensione delle singole celle, monitoraggio della temperatura di ogni cella e della stessa PCBA, bilanciamento interno delle celle (anche noto come "intra module balancing"), comunicazione dei dati suddetti al BMS di sistema attraverso una linea RS485, indicatore led dello stato del modulo (verde lampeggiante: normale esercizio; giallo lampeggiante: indicazione di avviso temporaneo; rosso: indicazione di guasto; nessuna indicazione led: indicazione di guasto o eccessiva sovra scarica) maniglie di trasporto, ed è esente da manutenzione. Il bilanciamento interno compensa piccoli sbilanciamenti di capacità fra le differenti celle all'interno del modulo: ciascuna cella ha un resistore normalmente disinserito dal circuito, che viene inserito se la tensione della cella è maggiore di 3.4 V e 40 mV più alta di quella della cella a tensione più bassa nel modulo.

Quattro moduli sono connessi in serie mediante cablaggi di potenza, a formare il pacco batterie da 51.2 V nominali. Il pacco batterie più il BMS di sistema ed i suoi accessori (es. contattore) costituiscono il sistema batterie completo, di cui si riportano di seguito le specifiche.

Specifiche del sistema d'accumulo 48 V – 100 Ah		
Tensione nominale		51.2 V
Capacità (C/5)		100 Ah
Dimensioni terminali inclusi (L x W x H)		1040 x 173 x 225 mm
Peso		65 kg
Terminali (filettati femmina)		M8 x 1.25
Energia specifica		78 Wh/kg
Densità di energia		126 Wh/l
Scarica Standard @ +23 °C	Max corrente continuativa	150 A
	Max corrente pulsante 30 sec.	300 A
	Cut – off	40 V
Carica Standard @ +23 °C	Tensione	58.4 V
	Corrente raccomandata	50 A
	Tempo di carica	2.5 h
Resistenza interna		6 mΩ
Temperatura di esercizio		-10 °C ÷ +50 °C
Temperatura di storage		-40 °C ÷ +50 °C
Umidità di esercizio		5% ÷ 95%
Grado IP		56

Tabella 17 - Specifiche del sistema d'accumulo 48 V – 100 Ah

Le dimensioni sono relative alla disposizione dei moduli in linea, come utilizzato nelle prove e rappresentato nella figura che segue.



Figura 36 - Sistema batterie 48V – 100 Ah

Il BMS di sistema

La principale funzione del BMS di sistema (vedere figura) è proteggere il sistema batterie dall'essere danneggiato. Il BMS realizza tale funzione monitorando continuamente lo stato delle batterie e, quando necessario, aprendo un contattore esterno connesso in serie alla batterie e sotto il suo controllo in modo da prevenire ogni ulteriore uso del sistema batterie. Ci sono due livelli di protezione: "avviso" ed "allarme". L'avviso è solo informativo, viene visualizzato ma non viene eseguito alcun intervento sul sistema batterie. Se, oltre l'avviso, si raggiunge una situazione di allarme, il BMS aprirà immediatamente il contattore che è sotto il suo controllo, in modo da prevenire il danneggiamento del sistema batterie.



Figura 37 - BMS di sistema

Si riportano di seguito i fattori che possono generare segnalazioni ed allarmi da parte del BMS.

Limiti di temperatura per avviso ed allarme



NORMAL Cell <60°C PCBA < 80°C	WARNING Cell > 60°C PCBA > 80°C	ALARM Cell > 65°C PCBA > 85°C
--	--	--

- Avviso di overtemperature: temperatura di cella 60 °C. Solo avviso, nessuna azione sul contattore. Accensione del flag "Over temperature warning" (vedere figura più avanti) per la visualizzazione dell'avviso.

- Allarme di overtemperature: temperatura di cella 65°C, o temperatura della scheda PCBA 85°C. Trasmissione via CAN della richiesta di apertura del contattore, accensione del flag "Over temperature alarm", apertura del contattore.

Limite di overvoltage



NORMAL Cell 2.8-3.9V	WARNING Cell > 3.9V	ALARM Cell > 4.0V
-------------------------	------------------------	----------------------

- Avviso di overvoltage: massima tensione di cella > 3.9 V. Solo avviso, nessuna azione sul contattore. Accensione del flag "Over voltage warning" (vedere figura più avanti) per la visualizzazione dell'avviso.
- Allarme di overvoltage: massima tensione di cella > 4.0 V. Trasmissione via CAN della richiesta di apertura del contattore, accensione del flag "Over voltage alarm", apertura del contattore.

Limite di undervoltage



ALARM Cell < 2.3V	WARNING Cell < 2.8V	NORMAL Cell 2.8-3.9V
----------------------	------------------------	-------------------------

- Avviso di scarica critica: minima tensione di cella < 2.8 V. Solo avviso, nessuna azione sul contattore. Accensione del flag "Critically discharged warning" (vedere figura più avanti) per la visualizzazione dell'avviso.
- Allarme di scarica critica: minima tensione di cella < 2.3 V. Trasmissione via CAN della richiesta di apertura del contattore, accensione del flag "Critically discharged alarm", apertura del contattore.

Le sue caratteristiche includono²⁰:

- Capacità di comunicazione con i moduli batteria, per il monitoraggio di questi ultimi, attraverso una linea RS485. I parametri monitorati includono temperatura, tensione, corrente e stato di carica (SOC) e degli allarmi multilivello.
- Comunicazione CAN per la registrazione e visualizzazione dei dati.
- Controllo di un contattore per la protezione dei moduli batterie (disconnessione del pacco batterie).
- Controllo del bilanciamento tra batteria e batteria.
- Funzionamento in bassa potenza quando il segnale "Key on" non è presente.

Altri allarmi:

²⁰ Nel presente elaborato si riportano solo le caratteristiche effettivamente utilizzate per l'esecuzione delle prove.

Module lost

Il BMS si aspetta di vedere il giusto numero di moduli sulla linea di comunicazione RS485. Se il BMS non può comunicare con tutti i moduli, viene attivato l'allarme "module lost": trascorsi 15 secondi dalla perdita di comunicazione, si accende il flag "Module lost" ed il contattore viene aperto.

Sanity error

Il sanity error è un'indicazione di non validità dei dati ricevuti dal BMS attraverso la linea RS485. Questo tipo di errore si verifica generalmente in presenza di rumore o di connessione labile sulla linea RS485.

Bassa capacità

Questa segnalazione viene effettuata quando il SOC è inferiore al 20%. Nessuna azione viene eseguita sul contattore.

Guasto del sensore di temperatura

Un sensore di temperatura si intende guasto se fornisce una lettura di temperatura al di fuori del campo $-40\text{ °C} \div +215\text{ °C}$. Generalmente ciò avviene quando il sensore di temperatura è aperto o in corto circuito. Il guasto viene gestito a livello di solo avviso, nessuna azione viene eseguita sul contattore, la lettura proveniente dal lettore guasto viene ignorata.

Guasto del sensore di tensione

Un sensore di tensione si intende guasto se fornisce una lettura del valore di tensione della cella corrispondente che cambia più di 1 V in tre secondi. Viene attivato solo un avviso e nessuna azione è eseguita sul contattore.

Guasto al sensore di corrente

Un sensore di corrente si intende guasto se la corrente riportata da un qualunque modulo è differente per più del 10% dalla corrente media di tutti i moduli del sistema. Viene attivato solamente un avviso e nessuna azione viene eseguita sul contattore.

Errore SOC

Scatta se la differenza di SOC fra due moduli è maggiore del 30%. Viene attivato solamente un avviso e nessuna azione viene eseguita sul contattore.

La figura che segue illustra i parametri visualizzati e resi disponibili sulla linea CAN.

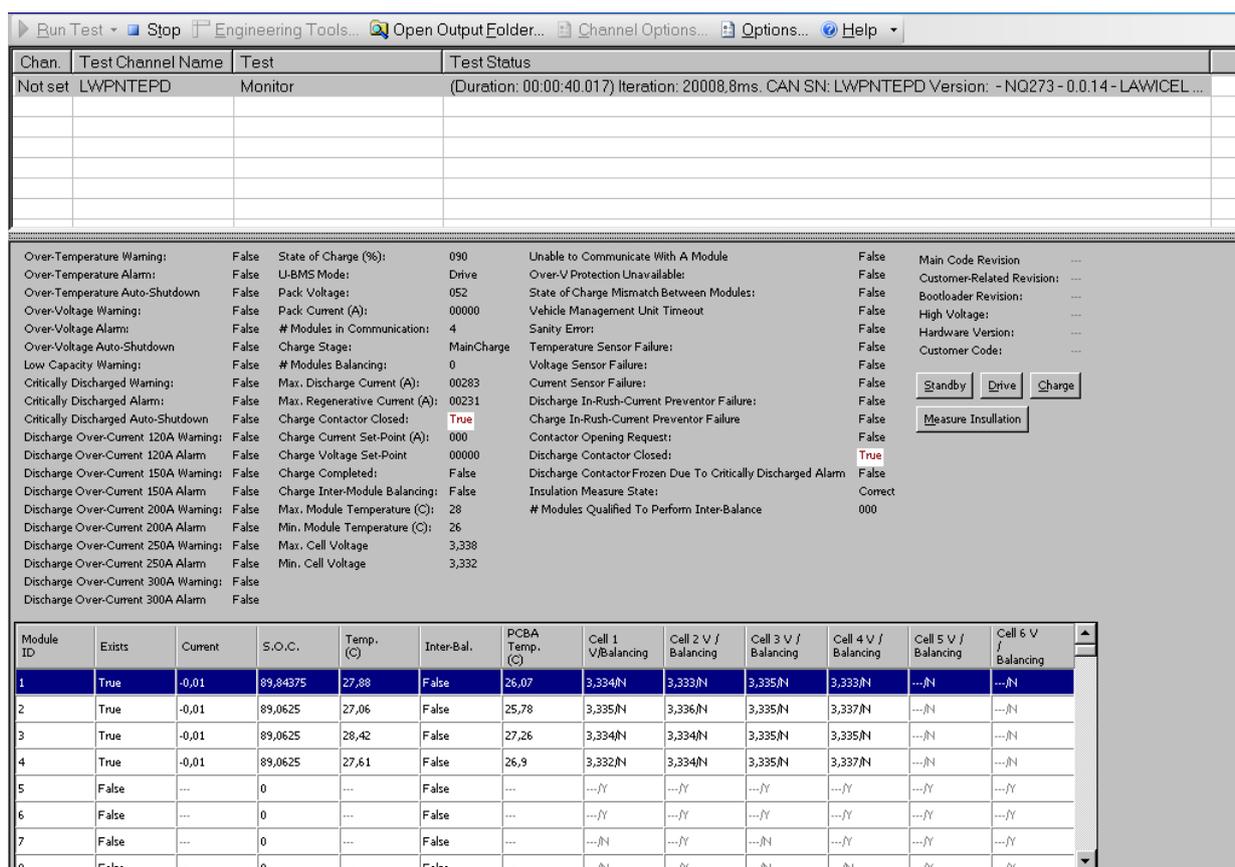


Figura 38 - Parametri monitorati dal BMS

Per l'esecuzione delle prove di laboratorio il BMS è stato utilizzato nel modo di esercizio, denominato "standalone", che non richiede un Vehicle Management Unit (VMU) o altro dispositivo²¹. Durante le prove la funzione di charger è svolta dal ciclatore, il quale controlla lo stato di carica riducendo progressivamente il valore della corrente di pacco, contemporaneamente il BMS controlla lo stato di tutte le celle, disconnettendo il pacco batterie attraverso il contattore in caso di anomalie: in tal modo viene prevenuta ogni possibilità di sovraccarica.

Il BMS di sistema controlla il bilanciamento tra moduli: esso compensa piccole differenze di capacità tra i differenti moduli ed è ottenuto tramite l'inserimento nel circuito di un resistore shunt quando il modulo ha una tensione maggiore di 3.4 V e più di 100 mV rispetto alla più bassa tensione di cella attraverso l'intero sistema.

Inoltre il BMS riceve dai moduli i valori dei rispettivi SOC attraverso la comunicazione RS485: il più basso di questi valori viene assunto come valore del SOC di sistema e comunicato all'esterno dal BMS di sistema attraverso la comunicazione CAN.

Descrizione della procedura e delle apparecchiature utilizzate.

Le prove sono state condotte assumendo come riferimento la procedura EUCAR "Specification of test procedures for hybrid electric vehicle traction batteries" ed in parte la "Procedura di prova comune per il gruppo di coordinamento CNR-ENEA-RSE", in fase di definizione. Stante lo

²¹ Nel caso di impiego sui veicoli il BMS deve essere utilizzato nel modo di esercizio denominato "slave", in cui interagisce con l'unità VMU attraverso la comunicazione CAN.

scopo delle prove, come già precisato, non è stato necessario applicare per intero il protocollo di test.

La funzione di carica e scarica è stata realizzata mediante l'impiego del ciclatore Eltra E-8619, le cui caratteristiche nominali sono: tensione massima 560V, corrente massima 175A, corrente di picco 250A per 60 secondi.

I test sono stati condotti alla temperatura di +23°C, alloggiando il sistema batterie all'interno della camera climatica Angelantoni modello UY2250SP, il cui campo di lavoro in temperatura ed umidità è -40 ÷ +100 °C, 15% ÷ 98%.

Il ciclatore è gestito dal software Eltra S276, che si occupa dell'interfaccia con l'operatore e dell'attuazione dei cicli di lavoro da questo impostati: i dati acquisiti sono registrati in un file CSV in cui, per ogni fase del profilo di lavoro, e per ogni istante di acquisizione, sono riportati il valore progressivo del tempo di fase, la tensione di batteria, la corrente, la capacità, l'energia ed, infine, il valore progressivo della capacità e dell'energia in carica e scarica, come sotto rappresentato.

Data	Ciclo	Fase	mciclo	Tempo	Tensione	Corrente	Capacità	Energia	Cap.C	Energ.C	Cap.S	Energ.S
				s	V	A	Ah	kWh	Ah	kWh	Ah	kWh

La frequenza di acquisizione è impostabile dall'operatore, con valore massimo pari a 5 Hz. E' anche possibile assegnare alla frequenza di acquisizione valori diversi in corrispondenza a fasi diverse.

Il software del BMS produce un'interfaccia con l'operatore ed una pagina di visualizzazione dei dati che è quella già mostrata in precedenza, i dati registrati sono riportati in una cartella di file CSV che contiene le tensioni delle singole celle (un file per ogni modulo), un file di dati generali un file relativo al bilanciamento tra i moduli ed un file relativo al bilanciamento all'interno dei moduli (un file per ogni modulo), un file relativo alle correnti di modulo, all'esistenza dei moduli, un file relativo alla temperatura dei moduli, un file relativo alle temperature delle schede PCBA, uno allo stato di carica ed infine un test report (impostazioni generali, es. tempo di acquisizione, data ed ora di inizio e chiusura sessione).

La Figura che segue riporta il ciclatore e la camera climatica utilizzati, insieme ai rispettivi PC impiegati per l'impostazione delle prove e la visualizzazione dei risultati.



Figura 39 - Ciclatore (sinistra) e camera climatica (destra) usati per le prove

Impostazione delle prove

Relativamente alla fase di impostazione delle prove, merita menzione il settaggio del valore minimo di tensione al ciclatore: sebbene il data sheet riporti il valore 10 V come Vmin per ciascun modulo, che corrisponde a 40 V per il sistema, è stato necessario impostare al ciclatore il valore 41,5V come Vmin. Difatti, i tentativi svolti a 40V e 41V davano luogo ad allarmi da parte del BMS che interveniva aprendo il contattore e disconnettendo il sistema batterie dal ciclatore. La Figura che segue mostra la pagina di visualizzazione dopo l'intervento del BMS tramite la richiesta di apertura del contattore.

L'esempio è utile per mostrare la modalità di intervento del BMS ed il suo beneficio dal punto di vista della sicurezza: come si vede, nessuna cella ha oltrepassato il proprio limite inferiore di funzionamento (2,5V).

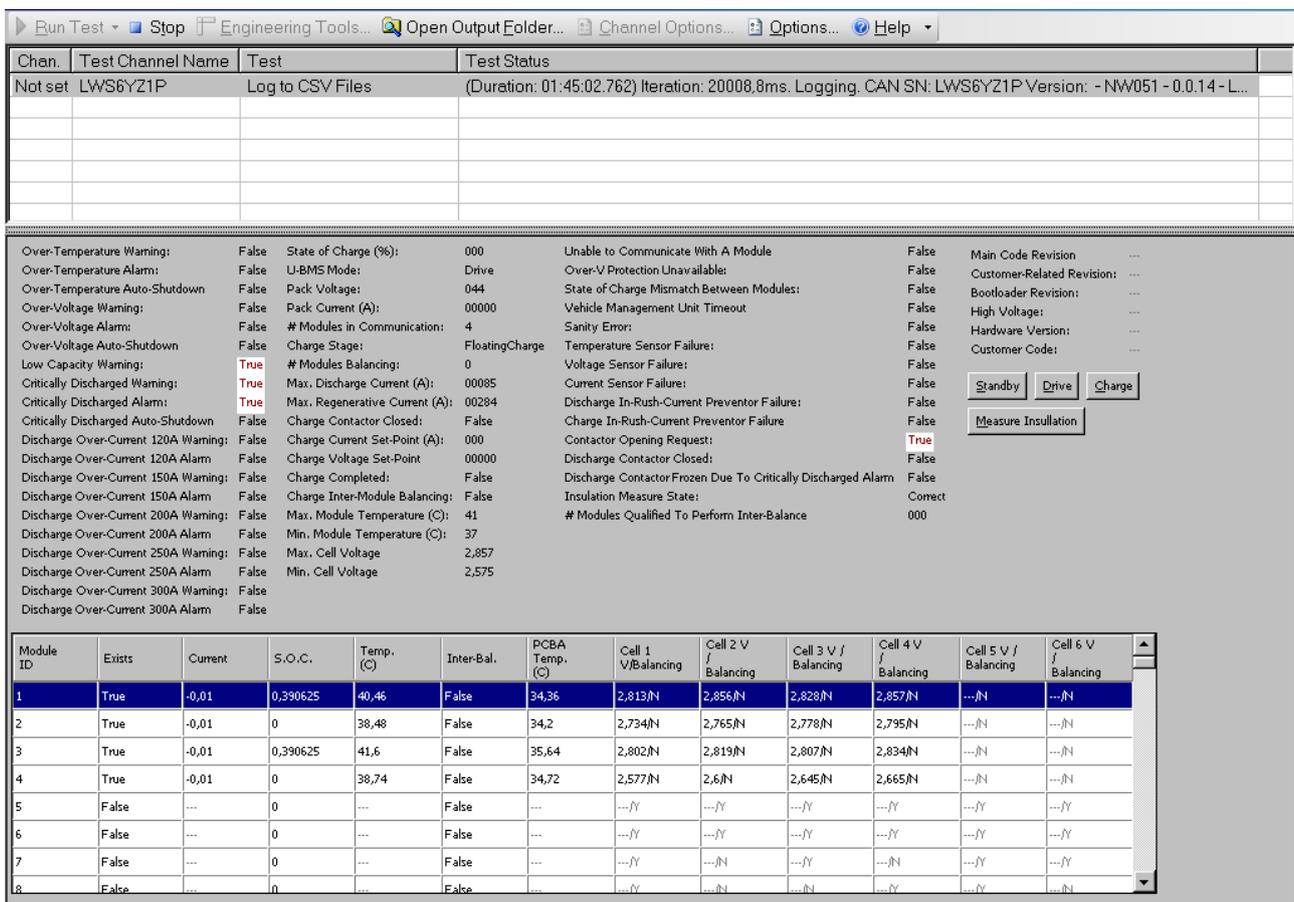


Figura 40 - Richiesta di apertura del contattore

Prove di capacità a differenti correnti di scarica

La rilevazione della capacità è stata effettuata secondo quanto imposto dalla normativa Eucar. In ogni rilevazione il sistema batterie è stato sottoposto a un ciclo completo di carica e scarica in cui sono stati registrati con frequenza di 1 acquisizione al secondo i valori di tensione e corrente ai morsetti del componente.

La capacità è pari a:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$

ed il suo calcolo in Ah viene direttamente fornito dal ciclatore (vedi pagine precedenti).

Ciascuna prova è stata eseguita partendo dallo stato di batteria carica, raggiunto mediante la precedente esecuzione di una carica completa, effettuata a corrente costante pari al valore raccomandato dal Costruttore (C/2) fino al limite di soglia superiore della tensione, per poi procedere a tensione costante riducendo progressivamente la corrente fino al valore di 0.5 A. Successivamente è stata effettuata la scarica a corrente costante al C rate caratteristico della prova, e di nuovo la batteria è stata ricaricata completamente decondo la procedura di carica standard pocanzi descritta. In questo modo è stato possibile calcolare il rendimento di carica come rapporto tra la quantità di carica fornita dalla batteria durante la fase di scarica e quella che è stato necessario fornire alla batteria nella successiva fase di ricarica per ripristinare lo stato di batteria completamente carica.

Essendo ciascun modulo limitato dalla corrente di scarica continua 1,5C, sono effettuate scariche per i valori di corrente C/5 = 20A, C/2 = 50A, 1C = 100A, 1,5C = 150A.

Tutte le prove sopra descritte sono state effettuate a temperatura ambiente di 23°C.

La figura che segue riporta i risultati ottenuti.

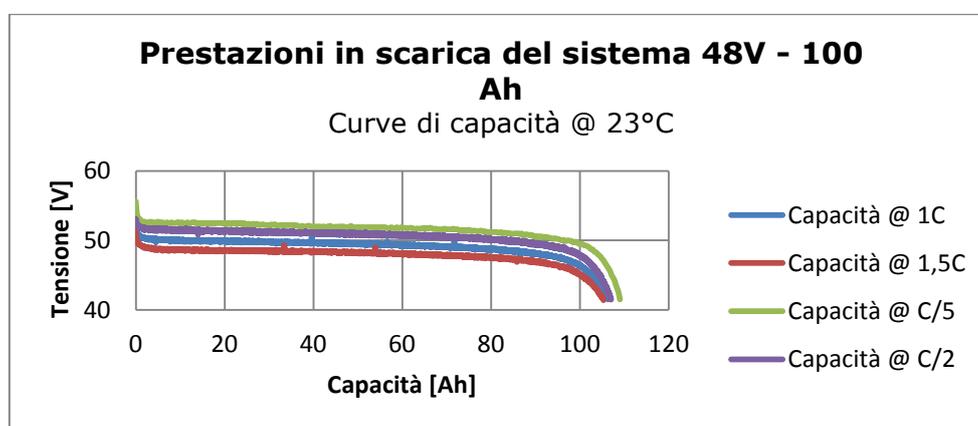


Figura 41 - Curve di capacità @ 23°C

Dalla figura sopra si riceve la conferma che la quantità di carica erogata dalla batteria dipende dal regime di scarica a cui essa viene sottoposta: si nota comunque che tutti i valori sono al di sopra della capacità nominale dichiarata dal Costruttore(100 Ah) e sono tutti piuttosto vicini tra loro. Si ha generalmente una legge tale per cui all'aumentare della corrente di scarica diminuisce la quantità di carica estraibile dal componente. Un diagramma (illustrato nella tabella e figura successive) che tiene conto di ciò è quello di Peukert, in cui si dispongono sulle ascisse del piano le correnti di scarica e sulle ordinate le corrispondenti quantità di carica estratte.

Capacità in funzione della corrente di scarica@ 23°C		
C rate	Corrente di scarica [A]	Capacità [Ah]
C/5	20	109,00
C/2	50	107,0
1C	100	106,3
1,5C	150	105,3

Tabella 18 - Capacità in funzione della corrente di scarica @ 23°C

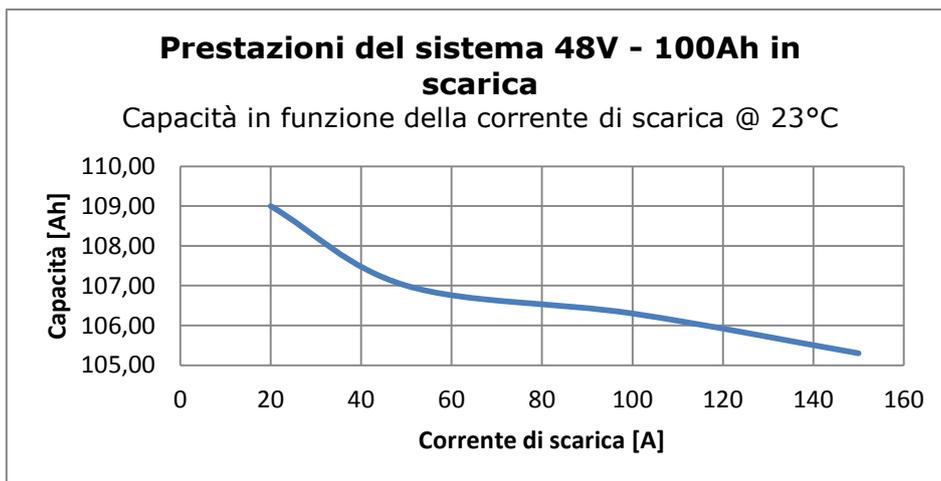


Figura 42 - Capacità in funzione della corrente di scarica @ 23°C

È possibile costruire anche il diagramma del rendimento di carica/scarica (o rendimento Coulombiano), definito come il rapporto tra la quantità di carica estratta al determinato C rate e la quantità di carica che è stato necessario inserire nella successiva carica standard per ripristinare lo stato di batteria completa.

Rendimento colombiano in funzione della corrente di scarica		
C rate	Corrente di scarica [A]	Rendimento [%]
C/5	20	0,988214
C/2	50	0,987996
1C	100	0,987918
1,5C	150	0,987805

Tabella 19 -Rendimento colombiano in funzione della corrente di scarica

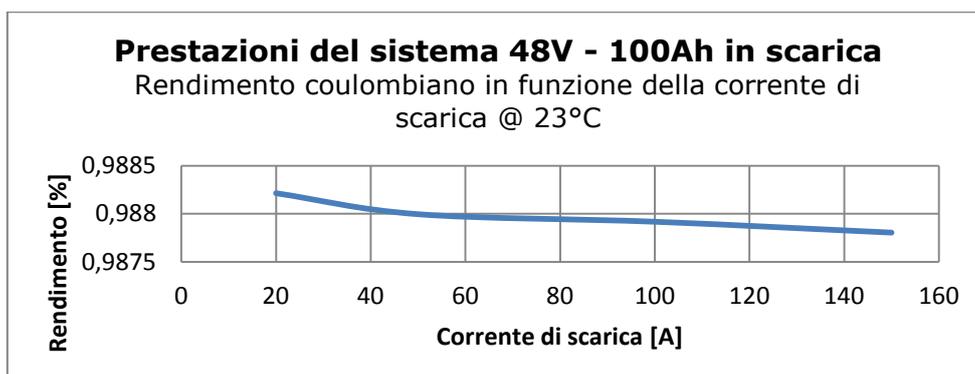


Figura 43 - Rendimento colombiano in funzione della corrente di scarica @ 23°C

Energia

Le misurazioni di questa grandezza sono state effettuate utilizzando i dati acquisiti durante le prove di capacità. Anche in questo caso l'energia dipende dalla modalità (corrente) di scarica e da altre condizioni (temperatura, vita della batteria) in cui l'energia viene erogata, esattamente come avviene per la capacità.

L'energia è calcolata attraverso la formula seguente:

$$\Delta E = \int_{t_1}^{t_2} V \cdot I \, dt$$

Anche in questo caso il valore del calcolo (in kWh) viene fornito direttamente dal ciclatore nel file di acquisizione dati.

Energia in funzione della corrente di scarica @ 23°C		
C rate	Corrente di scarica [A]	Energia [Wh]
C/5	20	5601,6
C/2	50	5389,2
1C	100	5207,1
1,5C	150	5032,3

Tabella 20 -Energia in funzione della corrente di scarica @ 23°C

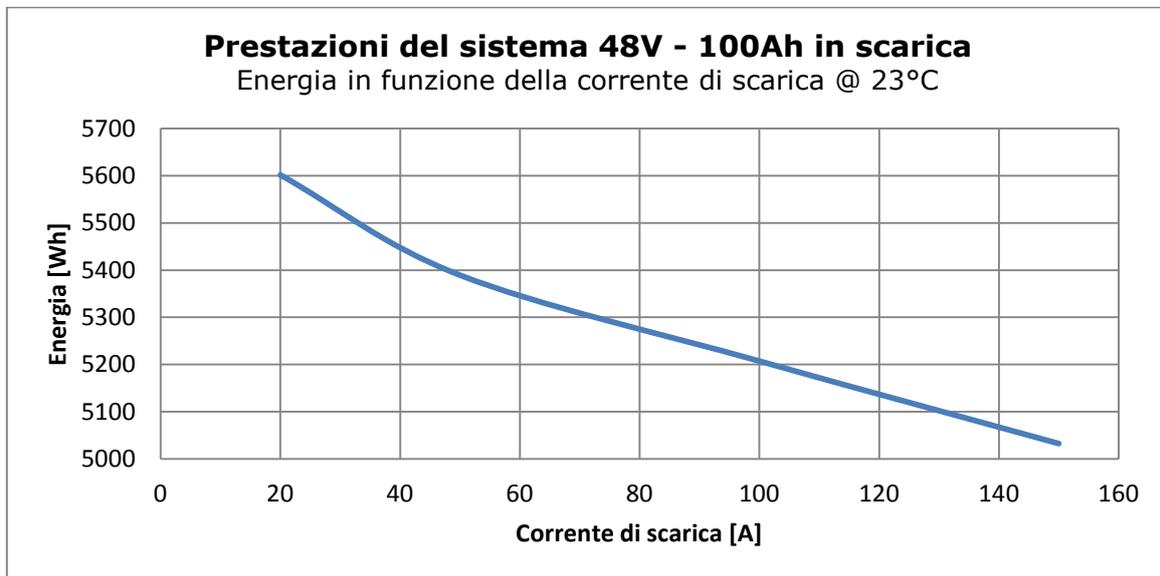


Figura 44 - Energia in funzione della corrente di scarica @ 23°C

Anche per l'energia è possibile definire il rendimento (rendimento energetico), come rapporto tra la l'energia fornita dalla batteria durante la scarica ad un dato C rate e quella che viene fornita alla batteria durante la successiva carica standard.

Rendimento in funzione della corrente di scarica @ 23°C		
C rate	Corrente di scarica [A]	Rendimento [%]
C/5	20	0,918325
C/2	50	0,898829
1C	100	0,876498
1,5C	150	0,856722

Tabella 21 - Rendimento in funzione della corrente di scarica @ 23°C

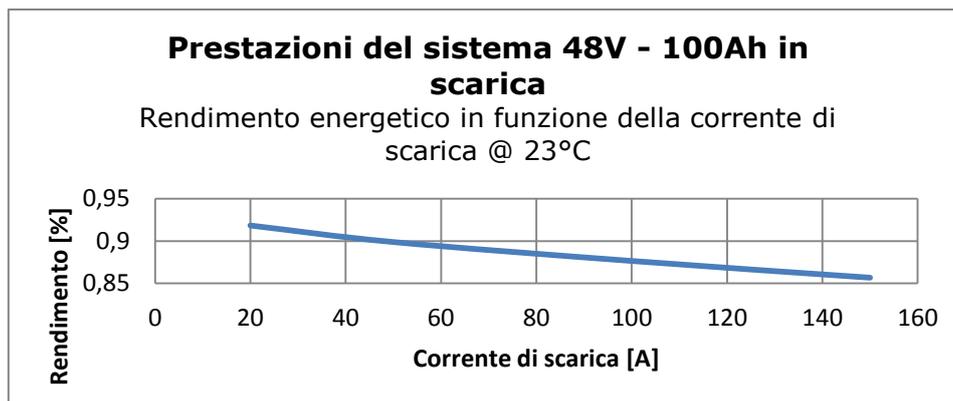


Figura 45 - Rendimento energetico in funzione della corrente di scarica @ 23°C

Dai grafici si nota che l'energia erogata presenta un andamento simile a quello della capacità: diminuisce all'aumentare della corrente di scarica. Simile è anche la caratteristica del rendimento energetico rispetto a quello di carica: esso assume però valori molto più piccoli. Dividendo l'energia per il valore del volume si ottiene la densità energetica, mentre dividendo per il valore della massa si ottiene l'energia specifica: nella tabella della pagina seguente tali parametri sono riportati sia in funzione dello C rate.

Energia specifica e densità d'energia in funzione della corrente di scarica @ 23°C			
C rate	Corrente di scarica	Energia specifica	Densità di energia
	A	Wh/kg	Wh/l
C/5	20	86,17846	138,3726
C/2	50	82,91077	133,1258
1C	100	80,10923	128,6275
1,5C	150	77,42	124,3096

Tabella 22 - Energia specifica e densità d'energia in funzione della corrente di scarica @ 23°C

Resistenza interna, OCV e potenza di picco

La prova inizia con un periodo di pausa, seguito da tre impulsi di corrente della durata di 30 secondi intervallati da brevi periodi di pausa. I primi due impulsi sono a 1C in scarica ed in carica ed il terzo è un impulso di scarica ad alta corrente. La prova è stata eseguita alla temperatura di 23°C ed a SOC 50%: questo valore dello stato di carica è stato ottenuto scaricando precedentemente la batteria alla corrente C/2. La sequenza è descritta nella Tabella.

Fase n.	Descrizione	Tempo
1	P	< 3 ore
2	DSCH @ 1C	30 sec
3	P	180 sec
4	CH @ 1C	30 sec
5	P	180 sec
6	DSCH @ I_{HC}	30 sec
7	P	180 sec

Tabella 23 - Sequenza per la misura della resistenza interna, OCV e potenza.

La corrente I_{HC} usata nella fase 6 è definita come il più alto valore consentito di corrente che può essere usato per 30 secondi in accordo con le specifiche del Costruttore. Nel caso in esame la prova è stata condotta a 250A invece che 300A, causa limite di corrente del ciclatore disponibile al momento di esecuzione della prova.

La Figura descrive in dettaglio il profilo di prova.

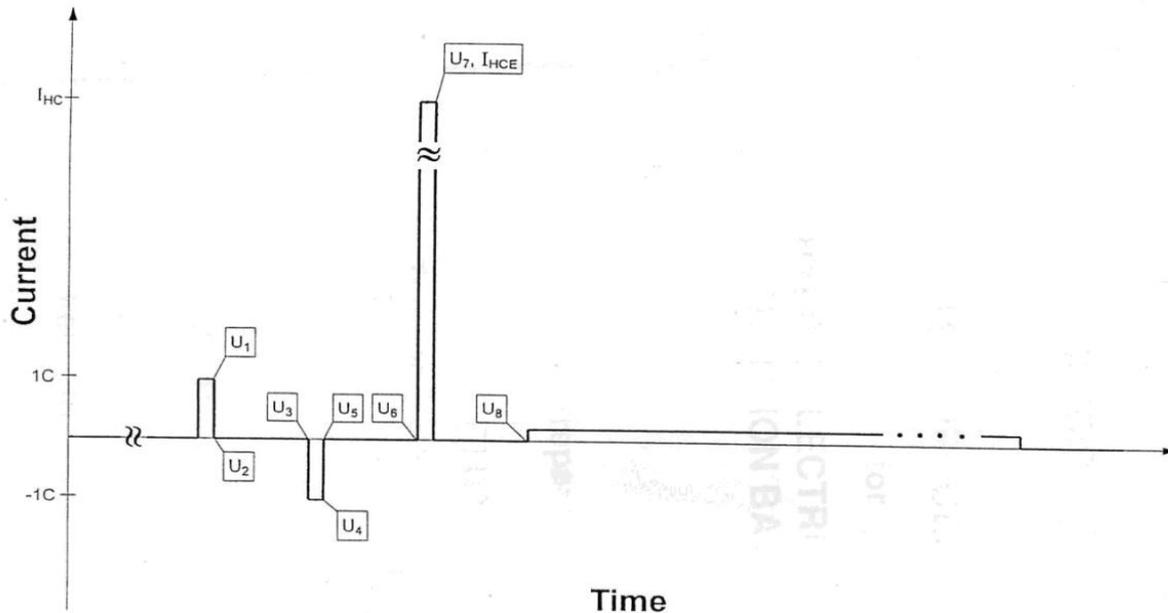


Figura 46 - Profilo per la determinazione della resistenza interna, OCV e potenza.

Con riferimento ai punti caratteristici del profilo, indicati in Figura, si calcolano cinque valori di resistenza interna mediante l'applicazione delle formule seguenti:

- resistenza interna in scarica: $R_{\Omega,dch} = (U_2 - U_1) / I_{1C}$
- resistenza interna complessiva in scarica 1C: $R_{1C,dch} = (U_3 - U_1) / I_{1C}$
- resistenza interna in carica: $R_{\Omega,cha} = (U_4 - U_5) / I_{1C}$
- resistenza interna complessiva in carica 1C: $R_{1C,cha} = (U_4 - U_6) / I_{1C}$
- resistenza interna complessiva in scarica a corrente elevata: $R_{HC,dch} = (U_8 - U_7) / I_{HC}$

La tensione a circuito aperto viene misurata dopo un periodo di riposo di 3 ore. Se la tensione in assenza di carico non varia meno dell'1% su un periodo di 30 minuti, il valore misurato può essere considerato stabile ed il periodo di pausa ridotto. Nel caso in esame, la tensione a circuito aperto è stata misurata dopo un periodo di riposo di 1 ora, avendo verificato la stabilizzazione della tensione stessa.

Sempre con riferimento ai punti caratteristici del profilo indicati in Figura, si calcolano sette valori di potenza, mediante l'applicazione delle formule seguenti:

- potenza ad alta corrente HCP = la potenza media nei 30 sec. di corrente impulsiva elevata
- potenza impulsiva a 30 secondi PP_{30} = la potenza a 30 secondi di corrente impulsiva elevata

- potenza impulsiva a 25 secondi PP_{25} = la potenza a 25 secondi di corrente impulsiva elevata
- potenza impulsiva a 20 secondi PP_{20} = la potenza a 20 secondi di corrente impulsiva elevata
- potenza impulsiva a 15 secondi PP_{15} = la potenza a 15 secondi di corrente impulsiva elevata
- potenza impulsiva a 10 secondi PP_{10} = la potenza a 10 secondi di corrente impulsiva elevata
- potenza impulsiva a 5 secondi PP_5 = la potenza a 5 secondi di corrente impulsiva elevata

La potenza impulsiva a 30 secondi è la potenza finale del tratto ad alta corrente.

Si riporta di seguito il profilo di prova realizzato dal ciclatore e, di seguito, i risultati della prova e della relativa elaborazione.

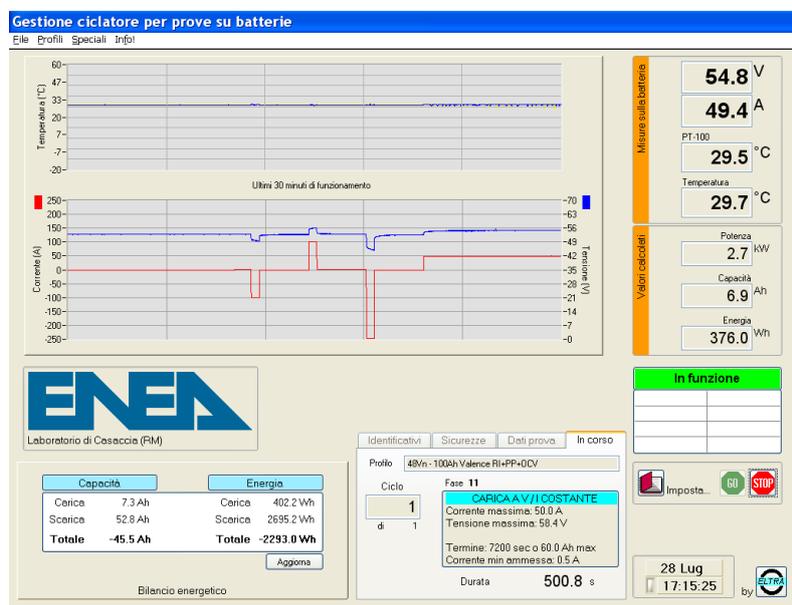


Figura 47 - Profilo realizzato dal ciclatore per la determinazione della resistenza interna, OCV e potenza.

Punti caratteristici del profilo di prova per la resistenza interna, OCV e potenza			
Tensioni [V]		Correnti [A]	
U_0	53,10		
U_1	49,50	I_{1C}	100,0
U_2	50,15		
U_3	52,90		
U_4	56,20		
U_5	55,55		
U_6	52,80		
U_7	44,90	I_7	248,4
U_8	52,70		

U _{5s}	46,10	I _{5s}	248,4
U _{10s}	45,70	I _{10s}	248,4
U _{15s}	45,50	I _{15s}	248,4
U _{20s}	45,40	I _{20s}	248,4
U _{25s}	45,00	I _{25s}	248,3
U _{30s}	44,90	I _{30s}	248,4

Tabella 24 - Punti caratteristici del profilo di prova per la resistenza interna, OCV e potenza

Sistema 48V 100Ah – Resistenza interna, OCV e potenza		
Grandezza	Vaolre	Unità
OCV @ SOC = 50% T = 23°C	53,10	V
resistenza interna in scarica	6,50	mΩ
resistenza interna complessiva in scarica 1C	34,00	mΩ
resistenza interna in carica	6,50	mΩ
resistenza interna complessiva in carica 1C	34,00	mΩ
resistenza interna complessiva in scarica a corrente elevata	31,40	mΩ
potenza media nei 30 sec. di corrente impulsiva elevata	11,285	kW
potenza a 05 secondi di corrente impulsiva elevata	11,451	kW
potenza a 10 secondi di corrente impulsiva elevata	11,352	kW
potenza a 15 secondi di corrente impulsiva elevata	11,302	kW
potenza a 20 secondi di corrente impulsiva elevata	11,277	kW
potenza a 25 secondi di corrente impulsiva elevata	11,174	kW
potenza a 30 secondi di corrente impulsiva elevata	11,153	kW

Tabella 25 - Sistema 48V 100Ah – Resistenza interna, OCV e potenza

Funzionamento del BMS: esempio di bilanciamento

A titolo di esempio del funzionamento del BMS, si riportano di seguito in dettaglio i dati relativi ad un caso pratico di bilanciamento.

Come mostra la figura che segue, e come spiegato in precedenza, il bilanciamento inizia durante la parte finale della fase di carica.

Nel caso raffigurato, nel momento a cui si riferisce la figura, è in atto il bilanciamento a livello di cella all'interno di ciascun modulo, "intra module balancing", e a livello di modulo, "inter module balancing". Più precisamente, le celle 2, 3 e 4 del modulo 1 sono in fase di equalizzazione, ovvero, come spiegato in precedenza, ciascuna di esse è scaricata parzialmente sulla propria resistenza, mentre la cella 1, che è quella a tensione più bassa nel modulo, non è interessata dal bilanciamento, come è ovvio, visto che per questo tipo di BMS il bilanciamento avviene scaricando le celle più cariche. Analogamente succede per il modulo 2, 3 e 4. Contemporaneamente, il modulo 1, 2 e 3 sono in fase di equalizzazione, cioè ciascuno di essi viene parzialmente scaricato sulla propria resistenza (di modulo, diversa da quelle usate per il bilanciamento delle celle), mentre il modulo 4 non è interessato dal bilanciamento a livello di modulo, essendo quello a tensione più bassa. Si riportano di seguito i dettagli delle tensioni parziali ed un istogramma delle stesse.

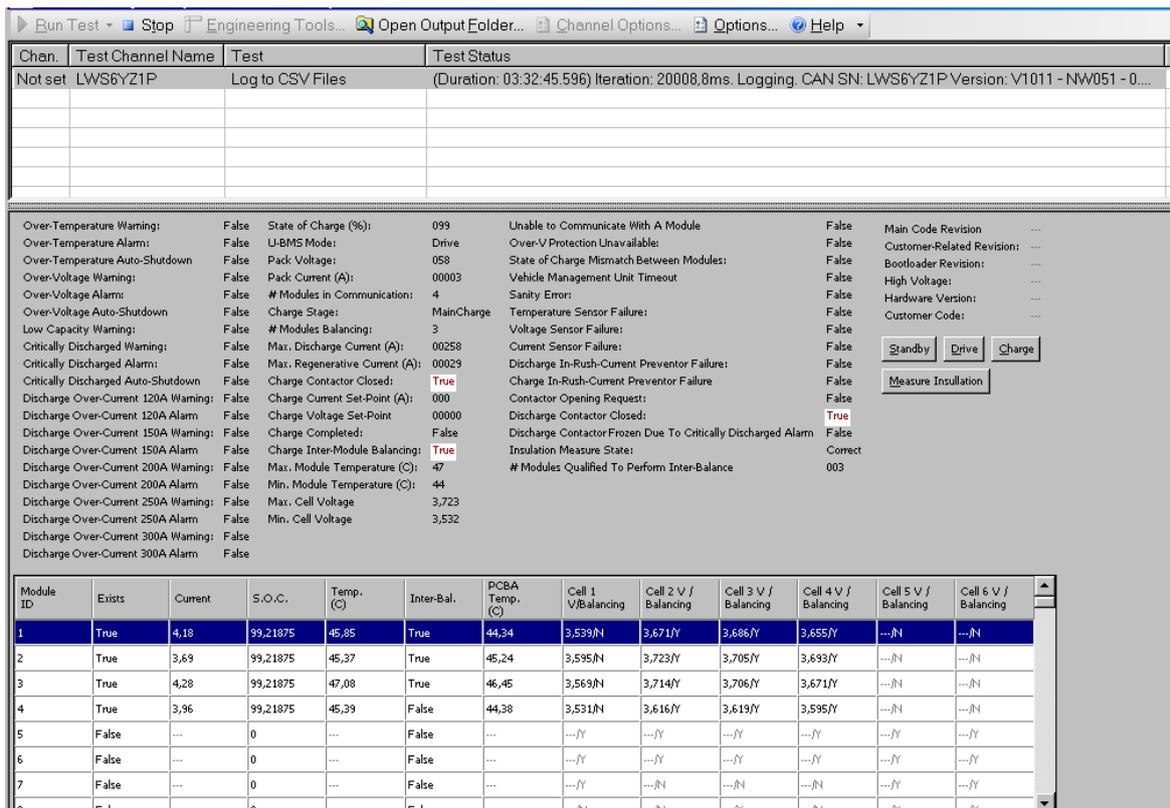


Figura 48 – Inizio bilanciamento

Modulo	V _{cella1}	V _{cella2}	V _{cella3}	V _{cella4}	V _{max}	V _{min}	ΔV _{celle, modulo}	V _{max, sistema}	V _{min, sistema}	ΔV _{celle, sistema}	V _{modulo}	V _{max, modulo}	V _{min, modulo}	ΔV _{moduli, sistema}
M1	3,539	3,671	3,686	3,655	3,686	3,539	0,147	3,723	3,531	0,192	14,551	14,716	14,361	0,355
M2	3,595	3,723	3,705	3,693	3,723	3,595	0,128				14,716			
M3	3,569	3,714	3,706	3,671	3,714	3,569	0,145				14,660			
M4	3,531	3,616	3,619	3,595	3,619	3,531	0,088				14,361			

Tabella 26 – Tensioni parziali ad inizio equalizzazione

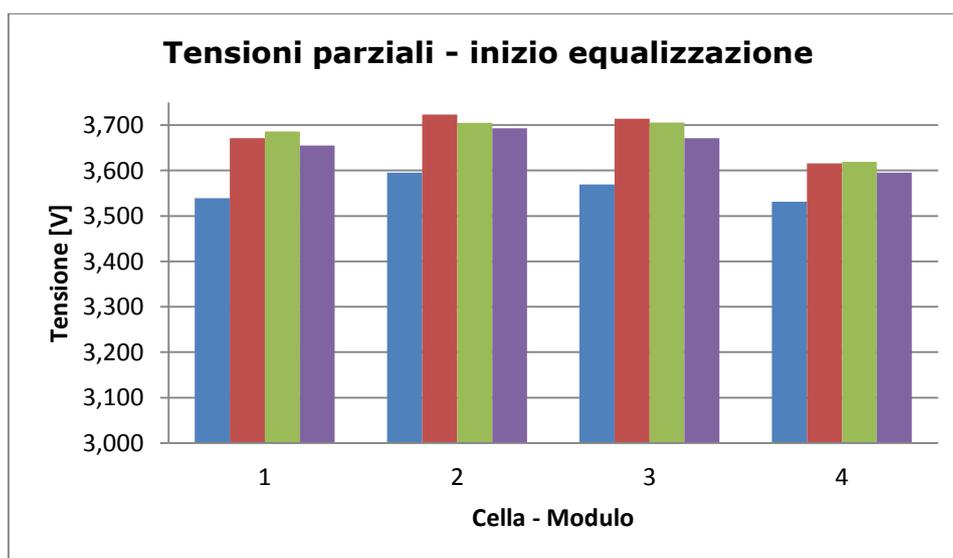


Figura 49 – Istogramma delle tensioni di cella ad inizio bilanciamento

Nel seguito si riporta la situazione in corrispondenza della fine della fase di carica.

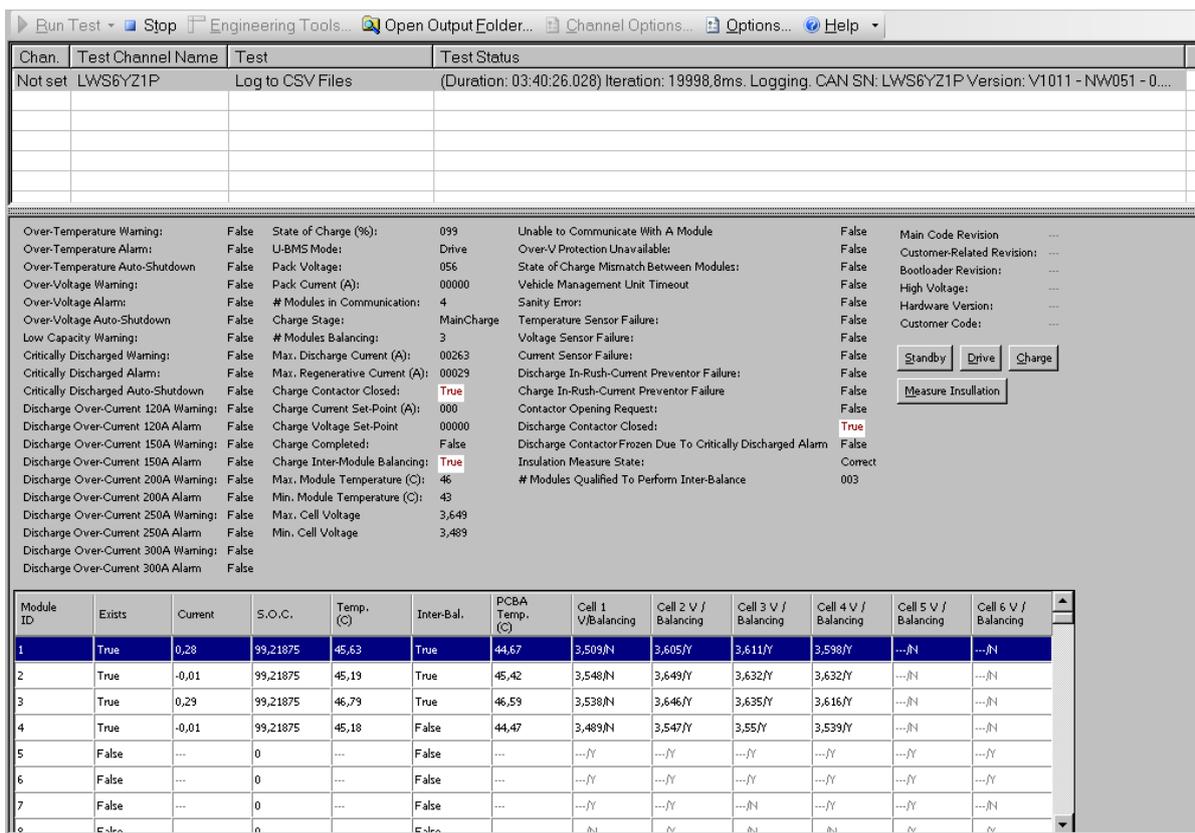


Figura 50 – Tensioni parziali durante il bilanciamento

L'equalizzazione continua, sia a livello di cella che di modulo, con i dettagli di seguito riportati.

Modulo	V _{cella1}	V _{cella2}	V _{cella3}	V _{cella4}	V _{max}	V _{min}	ΔV _{celle, modulo}	V _{max, sistema}	V _{min, sistema}	ΔV _{celle, sistema}	V _{modulo}	V _{max, modulo}	V _{min, modulo}	ΔV _{modulo, sistema}
M1	3,509	3,605	3,611	3,598	3,611	3,509	0,102	3,649	3,489	0,160	14,323	14,461	14,125	0,336
M2	3,548	3,649	3,632	3,632	3,649	3,548	0,101				14,461			
M3	3,538	3,646	3,635	3,616	3,646	3,538	0,108				14,435			
M4	3,489	3,547	3,550	3,539	3,550	3,489	0,061				14,125			

Tabella 27 – Tensioni parziali durante l' equalizzazione

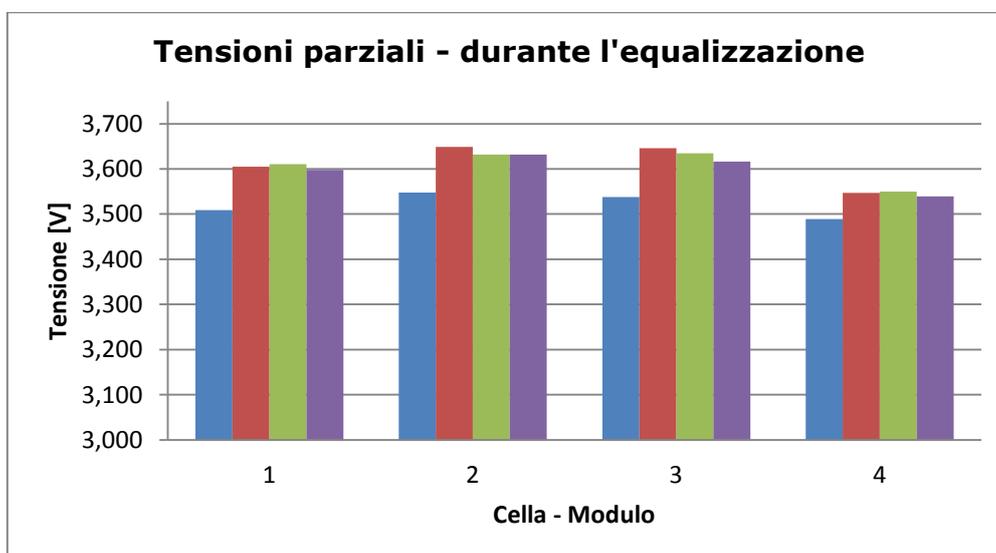


Figura 51 – Istogramma delle tensioni di cella durante l'equalizzazione

Il sistema viene lasciato in pausa con il BMS attivo, in modo da consentire la prosecuzione del bilanciamento. La figura che segue illustra la situazione dopo un'ora di pausa.

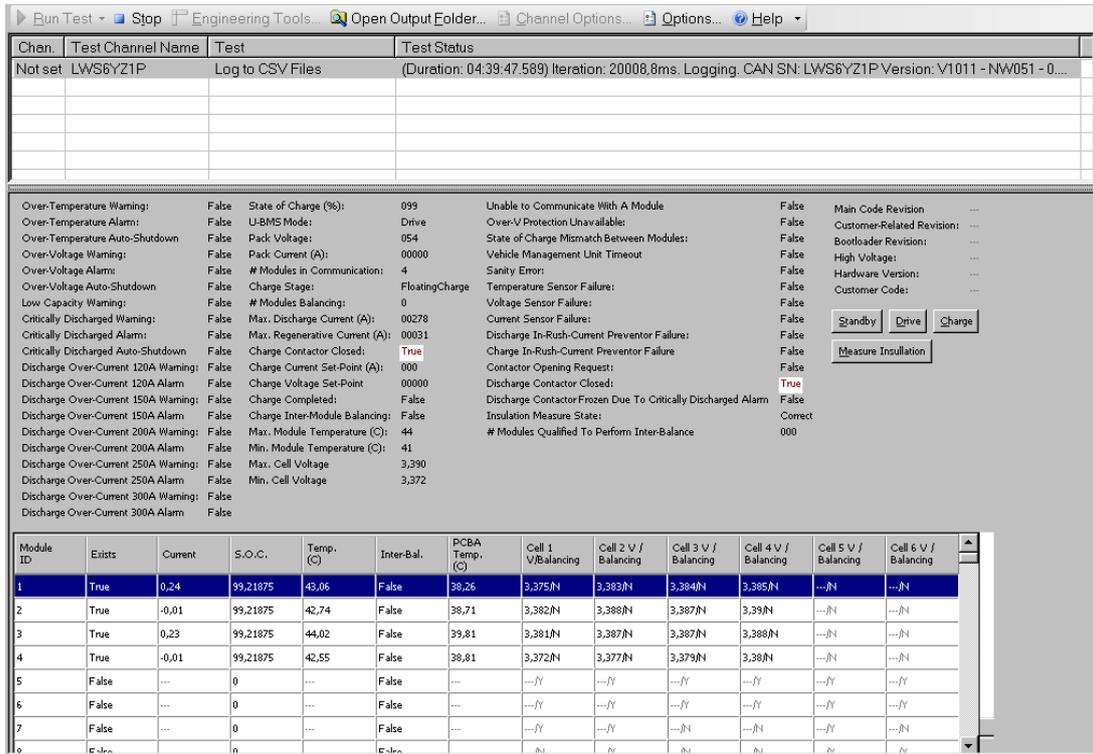


Figura 52 – Tensioni parziali a fine bilanciamento

L'equalizzazione è terminata ed ha condotto alla situazione riportata nella tabella e figura che seguono.

Modulo	V _{cella1}	V _{cella2}	V _{cella3}	V _{cella4}	V _{max}	V _{min}	$\Delta V_{\text{celle, modulo}}$	V _{max, sistema}	V _{min, sistema}	$\Delta V_{\text{celle, sistema}}$	V _{modulo}	V _{max, modulo}	V _{min, modulo}	$\Delta V_{\text{moduli, sistema}}$
M1	3,375	3,383	3,384	3,385	3,385	3,375	0,010	3,390	3,372	0,018	13,527	13,547	13,508	0,039
M2	3,382	3,388	3,387	3,390	3,390	3,382	0,008				13,547			
M3	3,381	3,387	3,387	3,388	3,388	3,381	0,007				13,543			
M4	3,372	3,377	3,379	3,380	3,380	3,372	0,008				13,508			

Tabella 28 – Tensioni parziali a fine equalizzazione

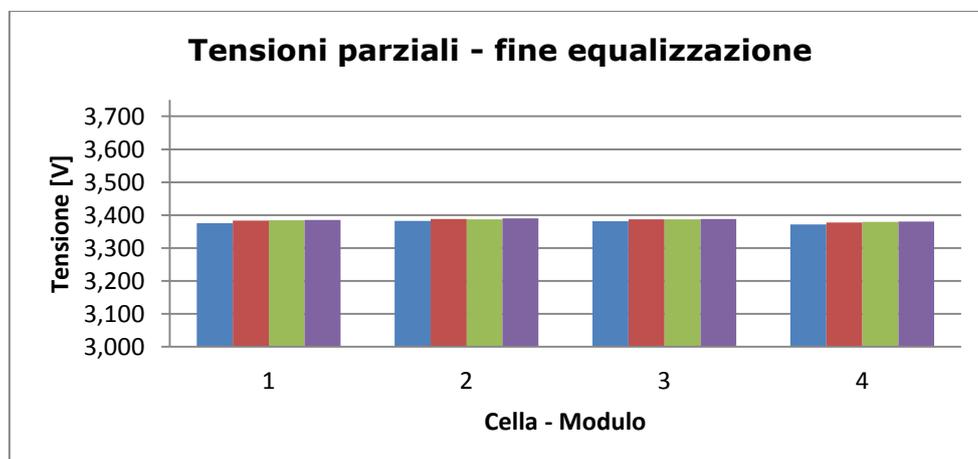


Figura 53 – Istogramma delle tensioni di cella a fine bilanciamento

Il confronto dei diagrammi e dei valori ΔV riportati nelle tabelle riferite rispettivamente all'inizio, durante, ed alla fine della fase di equalizzazione, consentono di vedere come la funzione di bilanciamento abbia ridotto notevolmente la situazione di squilibrio che si era manifestata a fine carica, consentendo di ottimizzare le prestazioni del sistema nella successiva fase di scarica.

12.2.2 Sistema 48 V - 20 Ah

Descrizione del sistema

Il sistema 48 V - 20 Ah è costituito dalla connessione in serie di 13 celle, a cui si associa un sistema BMS ed un ventilatore per il raffreddamento delle celle. Il tutto è racchiuso in un unico involucro, come mostra la figura seguente.



Figura 54 – Sistema 48V – 20Ah

La singola cella è del tipo litio-ioni, con catodo NMC (nichel - cobalto - manganese, $\text{Li}(\text{NiCoMn})\text{O}_2$), anodo in grafite ed elettrolita polimerico. Il suo involucro esterno è del tipo a bustina.



Figura 55 – Cella 3,65V – 20Ah

Si riportano di seguito le caratteristiche della singola cella e del sistema.

Specifiche della cella 3,65V - 20Ah		
Tensione nominale		3.65 V
Capacità nominale		20 Ah
Dimensioni terminali esclusi (L x W x H)		216 x 130 x 7.2 mm
Peso		0.425 kg
Energia specifica		175 Wh/kg
Densità di energia		370 Wh/l
Scarica Standard @ +23 °C	Max corrente continuativa	100 A
	Max corrente pulsante 10 sec.	200 A
	Tensione limite raccomandata	3.0 V
	Cut – off	2.5 V
Carica Standard @ +23 °C	Tensione	4.15 V
	Corrente raccomandata	10 A
	Tempo di carica	2.5 h
Resistenza interna		3 mΩ
Temperatura di esercizio		-30 °C ÷ +50 °C
Temperatura di storage		-30 °C ÷ +50 °C

Specifiche del pacco 48V – 20Ah		
Tensione nominale		46.8 V
Capacità nominale		20 Ah
Dimensioni (L x W x H)		282 x 153 x 166 mm
Peso		8.90 kg
Energia specifica		105 Wh/kg
Densità di energia		130 Wh/l
Scarica Standard @ +23 °C	Max corrente continuativa	60 A
	Max corrente pulsante 10 sec.	100 A
	Tensione limite raccomandata	39.0 V
	Cut – off	32.5 V
Carica Standard @ +23 °C	Tensione	53.90 V
	Corrente raccomandata	20 A
	Tempo di carica	1.5 h
Temperatura di esercizio		-30 °C ÷ +50 °C
Temperatura di storage		-30 °C ÷ +50 °C

Tabella 29 - Specifiche della cella 3,65V – 20Ah e del pacco 48V – 20Ah

Si noti come le prestazioni del sistema, soprattutto in termini di corrente erogabile durante la fase di scarica, siano inferiori a quelle della singola cella: ciò è dovuto alle differenti condizioni di smaltimento del calore, la cella singola smaltisce il calore meglio di quando viene disposta all'interno di un case insieme ad altre celle per formare un modulo o pacco.

Il BMS

Il BMS protegge e bilancia le celle, misura lo stato di carica, realizza la gestione termica e monitora l'intero sistema batterie, ottimizzandone l'esercizio in sicurezza ed efficienza. In caso di anomalia, il BMS disconnette il sistema batterie comandando l'apertura di un relè di tipo elettromeccanico.

E' costituito da una unità principale (main) ed una sottounità (sub).

La sottounità si occupa di:

- misura della tensione di cella e di modulo,
- misura della corrente e della temperatura del modulo,
- bilanciamento elettrico delle celle,
- riportare i dati all'unità principale attraverso comunicazione RS485,
- gestione termica e controllo del ventilatore.

L'unità principale si occupa di:

- misura della tensione di pacco,
- misura della corrente e della temperatura di pacco,
- stima del SOC e del SOH,
- ricevere i dati dalle sottounità attraverso comunicazione RS485,
- riportare i dati a dispositivi a livello gerarchico superiore tramite comunicazione CAN,
- controllo dello stato del contattore,
- controllo del sistema termico.

La figura che segue riporta i dettagli delle funzioni di monitoraggio, protezione, gestione e comunicazione. Le grandezze monitorate sono state già elencate in precedenza. Esaminando la funzione di protezione, si vede che il BMS interviene in caso di sovraccarica, corto circuito, valori anomali (in eccesso o in difetto) di tensione e temperatura. La funzione di ottimizzazione della gestione del sistema batterie passa per la misura del SOC ed SOH, il bilanciamento delle celle e la gestione termica. Il bilanciamento delle celle è di tipo passivo, in carica. Per quanto riguarda la comunicazione, in aggiunta a quanto già riportato, la RS232 consente il collegamento al PC per la visualizzazione dei dati comunicati dal BMS.



Figura 56 – Funzioni del BMS

Di seguito, a titolo di esempio, si riporta la schermata del BMS rilevata durante una fase di esercizio.



Figura 57 – Schermata principale del BMS del sistema 48V – 20Ah

Come si vede, i soli dati riportati sono: il tempo, la tensione totale, la corrente totale (in questo caso, trattandosi di un unico modulo, si ha identità tra modulo e pacco), un'indicazione di temperatura, la tensione media di cella e lo stato di carica (barra in alto a destra, graduata ad intervalli di SOC del 20%). Non vengono fornite informazioni generali (valore medio, minimo e massimo) o particolari (singoli valori) a livello di cella, per le quali il BMS è predisposto, si veda figura successiva.



Figura 58 – Schermata secondaria del BMS del sistema 48V – 20Ah

In effetti, il Costruttore ha dichiarato che il BMS definitivo è ancora in fase di sviluppo e pertanto è stato possibile dotare il sistema di un BMS aggiornato allo stato dell'arte all'atto della fornitura. La versione finale prevede anche una finestra di dialogo per il settaggio dei livelli di warning ed allarme e l'impostazione del tempo di acquisizione per la registrazione dei dati (si veda figura successiva).

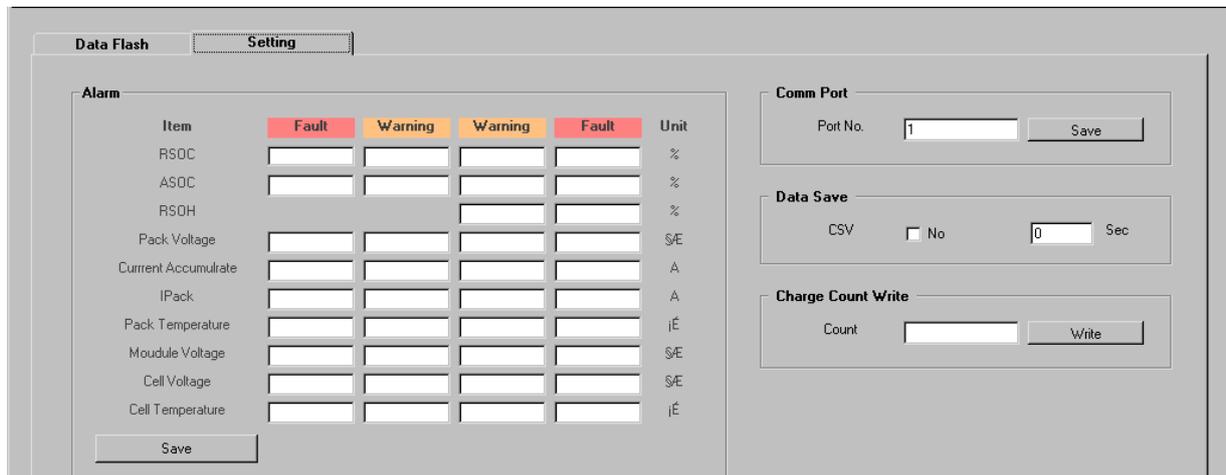


Figura 59 – Schermata di impostazione del BMS del sistema 48V – 20Ah

Allo stato attuale non è possibile effettuare le suddette impostazioni: il BMS lavora rigidamente con le impostazioni di fabbrica e non viene eseguita la registrazione dei dati (sola visualizzazione).

L'immagine che segue illustra il modo di funzionamento del BMS.

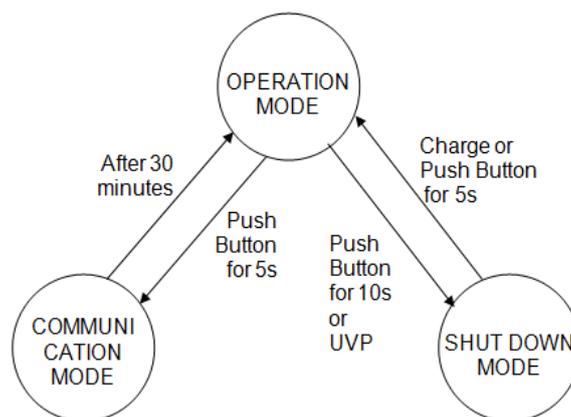


Figura 60 – Schema di funzionamento del BMS del sistema 48V – 20Ah

Dallo stato di "spegnimento", il BMS si attiva premendo per 5 secondi l'apposito tasto sul pannello frontale del pacco batterie, oppure sottoponendo il sistema stesso ad una fase di carica. In tal modo il BMS entra nello stato di "esercizio" ed il pacco batterie opera propriamente: se le celle sono in buone condizioni, il pacco eroga o riceve potenza. Anche se le protezioni operate dal BMS sono attive, in questo stato esso non rende visibili i dati monitorati.

Perché questo sia possibile, occorre interrogare il BMS, facendolo entrare nel modo di "comunicazione": ciò avviene premendo ancora per 5 secondi il tasto sul pannello frontale del pacco batterie. Nello stato di comunicazione, a cui si accede solo dallo stato di esercizio, il BMS rende visibili al PC i parametri già mostrati in precedenza (Figura) e rimane in tale stato per un tempo di 30 minuti, dopodiché torna automaticamente nello stato di esercizio, potendo essere nuovamente interrogato con una nuova pressione del tasto apposito. Finito l'esercizio, il BMS può essere riportato nello stato di spegnimento attraverso la pressione del tasto per 10 secondi: in tale stato si riduce l'autoscarica del pacco batteria in quanto il BMS non si alimenta (si tenga presente che nello stato di esercizio il BMS si alimenta dalle batterie stesse). Sempre per evitare scariche eccessive, il BMS si porta nello stato dormiente anche a seguito dell'intervento di una protezione per undervoltage (tensione di pacco inferiore a $31.46 \pm 0,05$ V per 20 secondi).

Descrizione della procedura e delle apparecchiature utilizzate.

Come nel caso precedente, le prove sono state condotte assumendo come riferimento la procedura EUCAR "Specification of test procedures for hybrid electric vehicle traction batteries" ed in parte la "Procedura di prova comune per il gruppo di coordinamento CNR-ENEA-RSE", in fase di definizione.

La funzione di carica e scarica è stata realizzata mediante l'impiego del ciclatore Eltra E-8619, le cui caratteristiche nominali sono: tensione massima 560V, corrente massima 175A, corrente di picco 250A per 60 secondi.

I test sono stati condotti alla temperatura di +23°C, alloggiando il sistema batterie all'interno della camera climatica Angelantoni modello EOS1000, il cui campo di lavoro in temperatura ed umidità è $-40 \div +180$ °C, $10\% \div 98\%$.

Il ciclatore è gestito dal software Eltra S276, che si occupa dell'interfaccia con l'operatore e dell'attuazione dei cicli di lavoro da questo impostati: i dati acquisiti sono registrati in un file CSV in cui, per ogni fase del profilo di lavoro, e per ogni istante di acquisizione, sono riportati il valore progressivo del tempo di fase, la tensione di batteria, la corrente, la capacità, l'energia ed, infine, il valore progressivo della capacità e dell'energia in carica e scarica, come sotto rappresentato.

Data	Ciclo	Fase	mciclo	Tempo	Tensione	Corrente	Capacità	Energia	Cap.C	Energ.C	Cap.S	Energ.S
				s	V	A	Ah	kWh	Ah	kWh	Ah	kWh

La frequenza di acquisizione è impostabile dall'operatore, con valore massimo pari a 5 Hz. E' anche possibile assegnare alla frequenza di acquisizione valori diversi in corrispondenza a fasi diverse.

La figura che segue mostra il pacco batterie all'interno della camera climatica, in prossimità del ciclatore.



Figura 61 – Camera climatica (sinistra) e ciclatore (destra) usati per i test del sistema 48V – 20Ah

Prove di capacità a differenti correnti di scarica

Anche in questo caso, la rilevazione della capacità è stata effettuata secondo quanto imposto dalla normativa Eucar ed in parte la "Procedura di prova comune per il gruppo di coordinamento CNR-ENEA-RSE", in fase di definizione. In ogni rilevazione il sistema batterie è stato sottoposto a un ciclo completo di carica e scarica in cui sono stati registrati con frequenza di 1 acquisizione al secondo i valori di tensione e corrente ai morsetti del componente.

La capacità è pari a:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$

ed il suo calcolo in Ah viene direttamente fornito dal ciclatore (vedi pagine precedenti).

Ciascuna prova è stata eseguita partendo dallo stato di batteria carica, raggiunto mediante la precedente esecuzione di una carica completa, effettuata a corrente costante pari al valore raccomandato dal Costruttore (1C) fino al limite di soglia superiore della tensione, per poi procedere a tensione costante riducendo progressivamente la corrente fino al valore di 0.5 A. Successivamente è stata effettuata la scarica a corrente costante al C rate caratteristico della prova, e di nuovo la batteria è stata ricaricata completamente secondo la procedura di carica standard pocanzi descritta. In questo modo è stato possibile calcolare il rendimento di carica come rapporto tra la quantità di carica fornita dalla batteria durante la fase di scarica e quella che è stato necessario fornire alla batteria nella successiva fase di ricarica per ripristinare lo stato di batteria completamente carica.

Essendo ciascun modulo limitato dalla corrente di scarica continua 3C, sono effettuate scariche per i valori di corrente $C/2 = 10A$, $1C = 20A$, $2C = 40A$, $3C = 60A$.

Tutte le prove sopra descritte sono state effettuate a temperatura ambiente di 23°C.

La figura che segue riporta i risultati ottenuti.

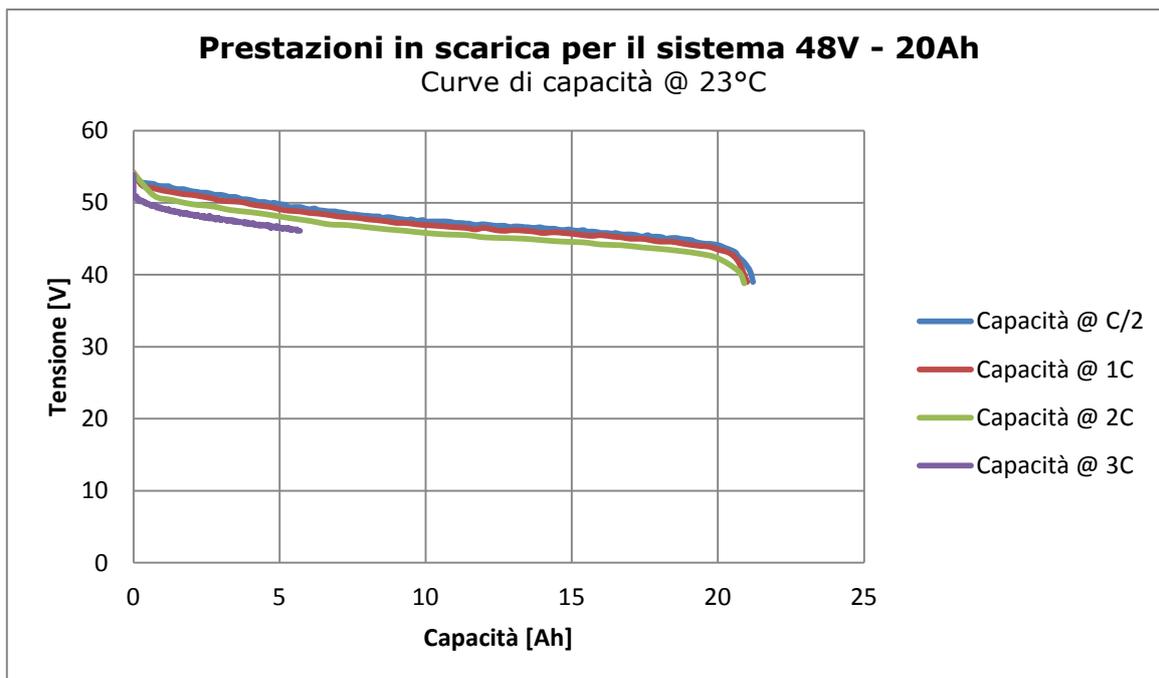


Figura 62 – Curve di capacità @ 23°C

Dalla figura sopra si riceve la conferma che la quantità di carica erogata dalla batteria dipende dal regime di scarica a cui essa viene sottoposta: si nota comunque che tutti i valori sono al di sopra della capacità nominale dichiarata dal Costruttore (20 Ah) e sono tutti piuttosto vicini tra loro. La prova di scarica a 3C viene sistematicamente interrotta dal BMS, il quale disconnette il sistema batterie dal ciclatore, nonostante i parametri globali di tensione, corrente e temperatura siano regolari. Si ha generalmente una legge tale per cui all'aumentare della corrente di scarica diminuisce la quantità di carica estraibile dal componente. Un diagramma (illustrato nella tabella e figura successive) che tiene conto di ciò è quello di Peukert, in cui si dispongono sulle ascisse del piano le correnti di scarica e sulle ordinate le corrispondenti quantità di carica estratte.

Capacità in funzione della corrente di scarica @ 23°C		
C rate	Corrente di scarica [A]	Capacità [Ah]
C/2	10	21.2
1C	20	21.0
2C	40	20.9

Tabella 30 – Capacità in funzione della corrente di scarica @ 23°C

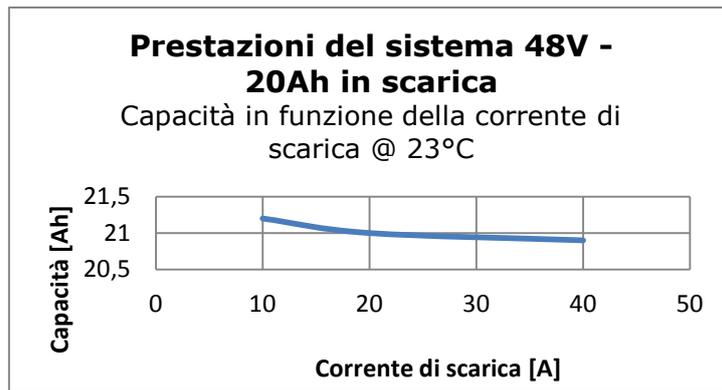


Figura 63 – Capacità in funzione della corrente di scarica @ 23°C

È possibile costruire anche il diagramma del rendimento di carica/scarica (o rendimento Coulombico), definito come il rapporto tra la quantità di carica estratta al determinato C rate e la quantità di carica che è stato necessario inserire nella successiva carica standard per ripristinare lo stato di batteria completa.

Rendimento coulombiano in funzione della corrente di scarica @ 23°C		
C rate	Corrente di scarica [A]	Rendimento %
C/2	10	0.972477
1C	20	0.950226
2C	40	0.950000

Tabella 31 – Rendimento coulombiano in funzione della corrente di scarica @ 23°C

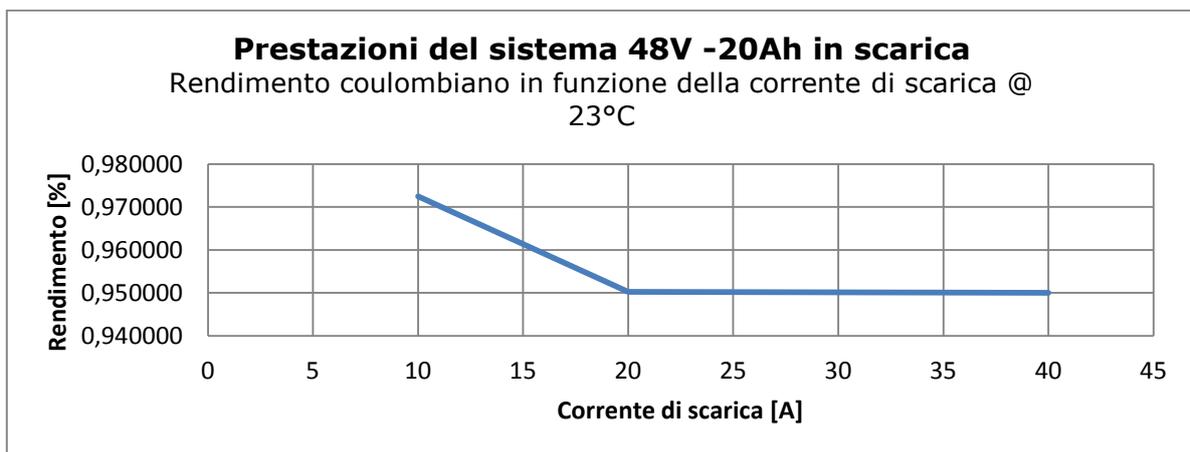


Figura 64 – Rendimento coulombiano in funzione della corrente di scarica @ 23°C

Energia

Le misurazioni di questa grandezza sono state effettuate utilizzando i dati acquisiti durante le prove di capacità. Anche in questo caso l'energia dipende dalla modalità (corrente) di scarica e da altre condizioni (temperatura, vita della batteria) in cui l'energia viene erogata, esattamente come avviene per la capacità.

L'energia è calcolata attraverso la formula seguente:

$$\Delta E = \int_{t_1}^{t_2} V \cdot I \, dt$$

Anche in questo caso il valore del calcolo (in kWh) viene fornito direttamente dal ciclatore nel file di acquisizione dati.

Energia in funzione della corrente di scarica @ 23°C		
C rate	Corrente di scarica [A]	Energia [Wh]
C/2	10	1009.7
1C	20	992.7
2C	40	963.1

Tabella 32 – Energia in funzione della corrente di scarica @ 23°C

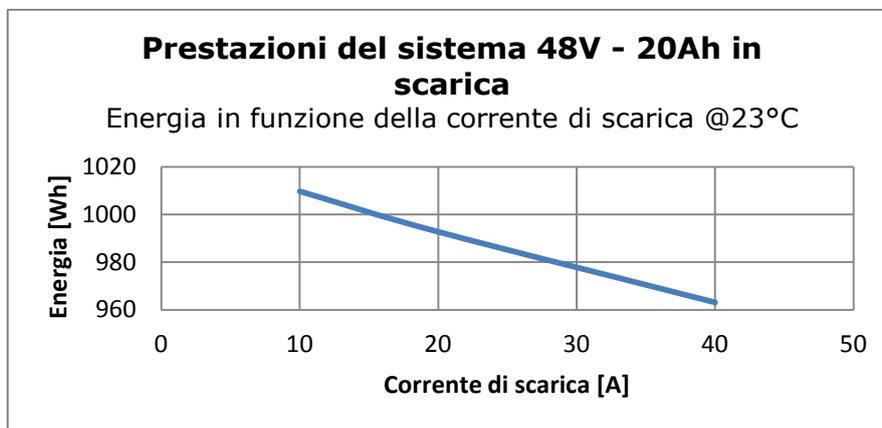


Figura 65 – Energia in funzione della corrente di scarica @23°C

Anche per l'energia è possibile definire il rendimento (rendimento energetico), come rapporto tra la l'energia fornita dalla batteria durante la scarica ad un dato C rate e quella che viene fornita alla batteria durante la successiva carica standard.

Rendimento energetico in funzione della corrente di scarica @ 23°C		
C rate	Corrente di scarica [A]	Rendimento [%]
C/2	10	0.911611
1C	20	0.887211
2C	40	0.868283

Tabella 33 – Rendimento energetico in funzione della corrente di scarica @ 23°C

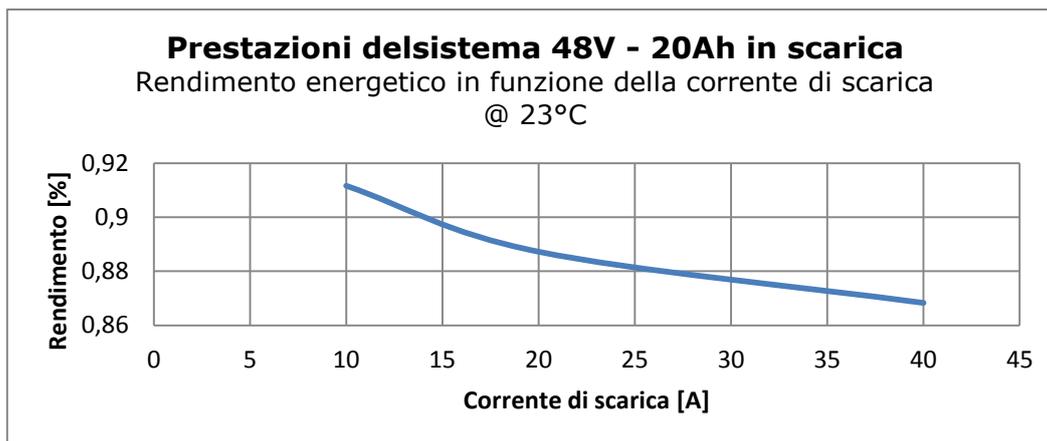


Figura 66 – Rendimento energetico in funzione della corrente di scarica @ 23°C

Dai grafici si nota che l'energia erogata presenta un andamento simile a quello della capacità: diminuisce all'aumentare della corrente di scarica. Simile è anche la caratteristica del rendimento energetico rispetto a quello di carica: esso assume però valori molto più piccoli. Dividendo l'energia per il valore del volume si ottiene la densità energetica, mentre dividendo per il valore della massa si ottiene l'energia specifica: nella tabella della pagina seguente tali parametri sono riportati sia in funzione dello C rate.

Energia specifica e densità di energia in funzione della corrente di scarica @23°C			
C rate	Corrente di scarica [A]	Energia specifica [Wh/kg]	Densità di energia [Wh/l]
C/2	10	113.4494	140.9755
1C	20	111.5393	138.6020
2C	40	108.2135	134.4692

Tabella 34 – Energia specifica e densità di energia in funzione della corrente di scarica @23°C

Resistenza interna, OCV e potenza di picco

La prova inizia con un periodo di pausa, seguito da tre impulsi di corrente della durata di 30 secondi intervallati da brevi periodi di pausa. I primi due impulsi sono a 1C in scarica ed in carica ed il terzo è un impulso di scarica ad alta corrente. La prova è stata eseguita alla temperatura di 23°C ed a SOC 50%: questo valore dello stato di carica è stato ottenuto scaricando precedentemente la batteria alla corrente C/2. La sequenza è descritta nella Tabella.

Fase n.	Descrizione	Tempo
1	P	< 3 ore
2	DSCH @ 1C	30 sec
3	P	180 sec
4	CH @ 1C	30 sec
5	P	180 sec
6	DSCH @ I_{HC}	30 sec
7	P	180 sec

Tabella 35 - Sequenza per la misura della res. int., OCV e potenza.

La corrente I_{HC} usata nella fase 6 è definita come il più alto valore consentito di corrente che può essere usato per 30 secondi in accordo con le specifiche del Costruttore. Nel caso in esame

la prova è stata condotta a 250A invece che 300A, causa limite di corrente del ciclatore disponibile al momento di esecuzione della prova.

La Figura descrive in dettaglio il profilo di prova.

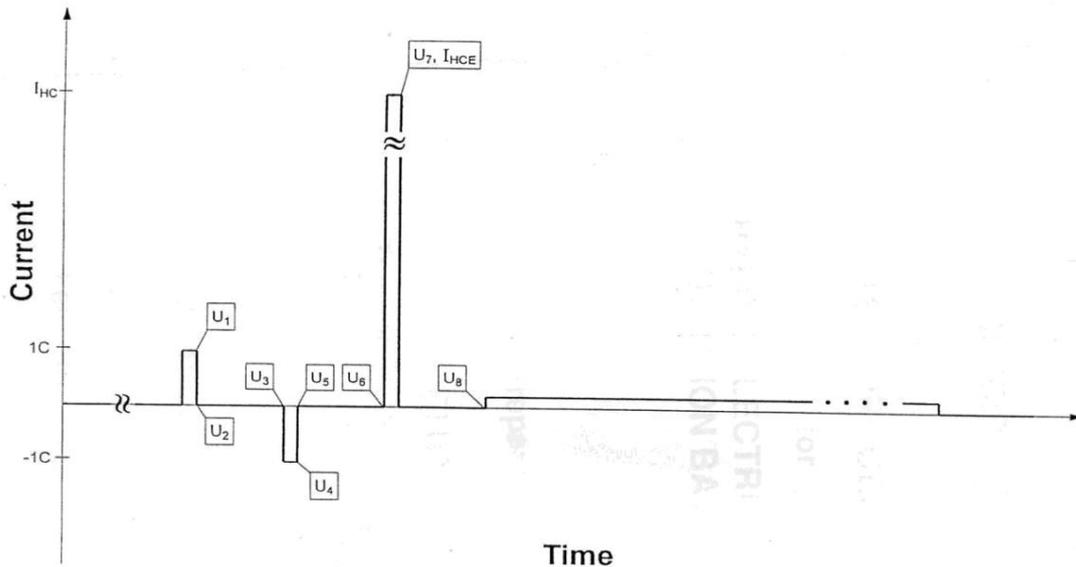


Figura 67 - Profilo per la determinazione della resistenza interna, OCV e potenza.

Con riferimento ai punti caratteristici del profilo, indicati in Figura, si calcolano cinque valori di resistenza interna mediante l'applicazione delle formule seguenti:

- resistenza interna in scarica: $R_{\Omega,dch} = (U_2 - U_1) / I_{1C}$
- resistenza interna complessiva in scarica 1C: $R_{1C,dch} = (U_3 - U_1) / I_{1C}$
- resistenza interna in carica: $R_{\Omega,cha} = (U_4 - U_5) / I_{1C}$
- resistenza interna complessiva in carica 1C: $R_{1C,cha} = (U_4 - U_6) / I_{1C}$
- resistenza interna complessiva in scarica a corrente elevata: $R_{HC,dch} = (U_8 - U_7) / I_{HC}$

La tensione a circuito aperto viene misurata dopo un periodo di riposo di 3 ore. Se la tensione in assenza di carico non varia meno dell'1% su un periodo di 30 minuti, il valore misurato può essere considerato stabile ed il periodo di pausa ridotto. Nel caso in esame, la tensione a circuito aperto è stata misurata dopo un periodo di riposo di 1 ora, avendo verificato la stabilizzazione della tensione stessa.

Sempre con riferimento ai punti caratteristici del profilo indicati in Figura, si calcolano sette valori di potenza, mediante l'applicazione delle formule seguenti:

- potenza ad alta corrente HCP = la potenza media nei 30 sec. di corrente impulsiva elevata
- potenza impulsiva a 30 secondi PP₃₀ = la potenza a 30 secondi di corrente impulsiva elevata
- potenza impulsiva a 25 secondi PP₂₅ = la potenza a 25 secondi di corrente impulsiva elevata
- potenza impulsiva a 20 secondi PP₂₀ = la potenza a 20 secondi di corrente impulsiva elevata

- potenza impulsiva a 15 secondi PP_{15} = la potenza a 15 secondi di corrente impulsiva elevata
- potenza impulsiva a 10 secondi PP_{10} = la potenza a 10 secondi di corrente impulsiva elevata
- potenza impulsiva a 5 secondi PP_5 = la potenza a 5 secondi di corrente impulsiva elevata

La potenza impulsiva a 30 secondi è la potenza finale del tratto ad alta corrente.

Si riporta di seguito il profilo di prova realizzato dal ciclatore e, di seguito, i risultati della prova e della relativa elaborazione.

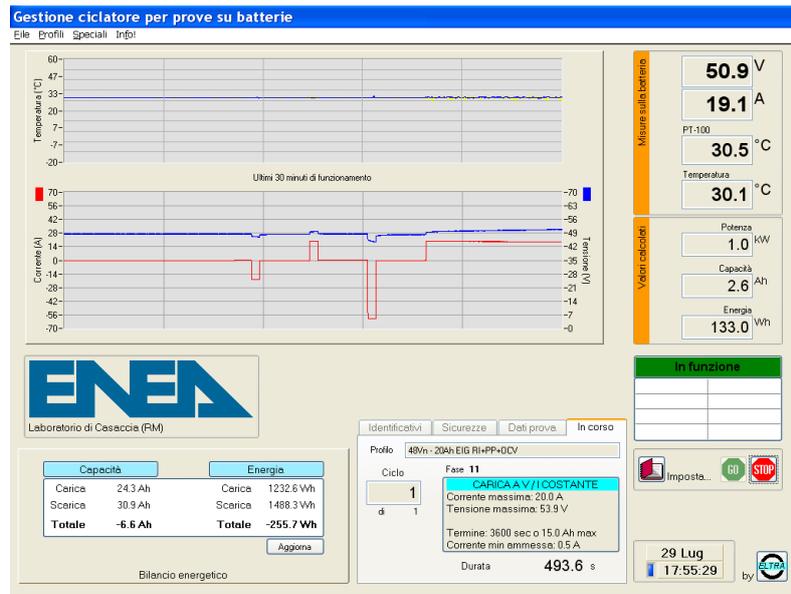


Figura 68 - Profilo per la determinazione della resistenza interna, OCV e potenza realizzato dal ciclatore.

Punti caratteristici del profilo per la resistenza interna, OCV e potenza			
Tensioni [V]		Correnti [A]	
U_0	48,50		
U_1	47,00	I_{1C}	20
U_2	47,35		
U_3	48,30		
U_4	49,80		
U_5	49,55		
U_6	48,50		
U_7	44,50	I_7	60
U_8	48,30		
U_{5s}	45,40	I_{5s}	60
U_{10s}	45,10	I_{10s}	60
U_{15s}	44,90	I_{15s}	60
U_{20s}	44,70	I_{20s}	60
U_{25s}	44,40	I_{25s}	60
U_{30s}	44,50	I_{30s}	60

Tabella 36 – Punti caratteristici del profilo per la resistenza interna, OCV e potenza

Sistema 48V 100Ah. Resistenza interna, OCV e potenza		
Grandezza	Valore	Unità
OCV @ SOC = 50% T = 23°C	48,50	V
resistenza interna in scarica	17,50	mΩ
resistenza interna complessiva in scarica 1C	65,00	mΩ
resistenza interna in carica	12,50	mΩ
resistenza interna complessiva in carica 1C	65,00	mΩ
resistenza interna complessiva in scarica a corrente elevata	63,33	mΩ
potenza media nei 30 sec. di corrente impulsiva elevata	2,690	kW
potenza a 05 secondi di corrente impulsiva elevata	2,724	kW
potenza a 10 secondi di corrente impulsiva elevata	2,706	kW
potenza a 15 secondi di corrente impulsiva elevata	2,694	kW
potenza a 20 secondi di corrente impulsiva elevata	2,682	kW
potenza a 25 secondi di corrente impulsiva elevata	2,664	kW
potenza a 30 secondi di corrente impulsiva elevata	2,670	kW

Tabella 37 – Sistema 48V 100Ah. Resistenza interna, OCV e potenza

Funzionamento del BMS

Come caso tipico si analizza il comportamento del BMS durante i tentativi di scarica a 3C.

Come detto, la prova viene sistematicamente interrotta dopo 5 minuti di funzionamento. Si veda in proposito la figura seguente, fornita dal ciclatore (non considerare le indicazioni di temperatura in quanto i rispettivi sensori non erano collegati, vista l'impossibilità di accedere all'interno del case).

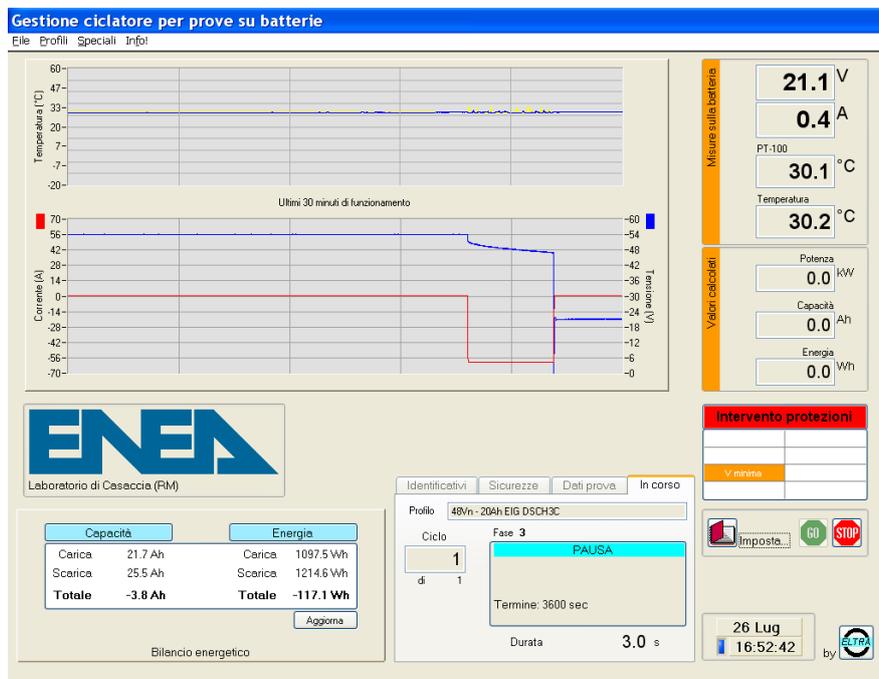


Figura 69 – Intervento del BMS durante la prova di scarica a corrente massima

A causa dell'intervento del BMS, la batteria viene disconnessa dal ciclatore con la conseguenza che la tensione scende bruscamente a zero e questo determina a sua volta l'intervento della protezione del ciclatore per allarme Vmin.

Analizzando i dati visualizzati dal BMS durante la fase di scarica (figura seguente) si nota che i valori dei parametri globali risultavano regolari.



Figura 70 – Schermata del BMS durante la prova di scarica a corrente massima

La mancanza di ulteriori informazioni fornite dal BMS, non consente di fare una diagnosi precisa: la conoscenza delle tensioni e temperature delle singole celle, consentirebbe di capire se qualche cella si trova in difficoltà durante la scarica e, raggiungendo il limite inferiore di tensione e/o quello superiore di temperatura, determina l'arresto del sistema e ne limita la prestazione, pur se i parametri globali sono regolari.

12.3 Specifiche tecniche per il Battery Management System.

Principali parametri di progettazione del BMS

Ci sono tre obiettivi principali comuni a tutti i sistemi di gestione delle batterie:

- proteggere le celle da danni;
- prolungare la vita delle celle;
- mantenere il sistema batterie in uno stato in cui è possibile soddisfare i requisiti funzionali della domanda per la quale è stato costruito, ottimizzandone le prestazioni.

Per raggiungere questi obiettivi, il BMS può includere una o più delle seguenti funzioni:

- protezione della cella

Proteggere la batteria da condizioni al di fuori di quelle operative è fondamentale per tutte le applicazioni BMS. In pratica, il BMS deve assicurare una protezione completa delle celle evitando tutti gli eventuali funzionamenti al di fuori dei limiti operativi. Nella protezione delle celle in generale si dovrebbero affrontare i seguenti eventi indesiderati o condizioni:

- sovratensione o tensione sotto il limite di cut off;
- corrente eccessiva;
- corto circuito;
- temperatura e pressione all'interno della cella;
- temperatura ambiente;
- abusi.

A tale scopo è necessario monitorare le singole celle che compongono la batteria e mantenerle nei loro limiti operativi, fornendo un segnale di allarme in caso di condizioni incontrollate, di perdita di comunicazioni o di un abuso, isolando la batteria in caso di emergenza. Nella sua forma più semplice, il BMS prevede un interruttore "ON/OFF" sensibile ad un guasto o ad una condizione di allarme, come un sovraccarico, che isola completamente la batteria con l'apertura dei contatti principali

- controllo della carica

Questa è una caratteristica essenziale del BMS, che deve occuparsi di fornire l'algoritmo ottimale di carica per caricare le celle. L'uso di un metodo inadeguato di ricarica può seriamente ridurre la durata di una batteria o addirittura provocarne la rottura. Infatti, quando la batteria è completamente carica, la corrente di ricarica non viene più usata dalla batteria per caricarsi e conseguentemente deve essere dissipata in qualche modo: in tali condizioni la dissipazione della corrente di carica provoca la generazione di calore e di gas che sono entrambi dannosi per le batterie e la sicurezza degli operatori. L'essenza di una buona ricarica deve essere in grado di rilevare quando la ricostruzione dei prodotti chimici elettrochimici è completa e fermare il processo prima che si verifichino dei danni, mantenendo sempre la cella nei limiti di tensione e temperatura. Nella maggior parte dei casi la ricarica termina quando si raggiunge un limite di tensione chiamata tensione di terminazione.

- determinazione del SOC

La determinazione del SOC, oltre ad essere utile per fornire all'utente l'indicazione della capacità residua della batteria (analogia col serbatoio di carburante di un veicolo), è necessaria al fine di garantire un funzionamento ottimale della batteria. Il controllo della SOC è una funzione importante del BMS e nelle applicazioni automobilistiche è fondamentale la sua conoscenza per la gestione efficiente e sicura dei flussi di energia.

Il SOC è determinato essenzialmente integrando il flusso di corrente nel tempo.

- bilanciamento delle celle:

In un pacco batteria si possono avere piccole differenze tra le celle, dovute alle tolleranze di costruzione o alle condizioni di esercizio, che tendono ad incrementarsi con l'esecuzione di ogni ciclo di carica/scarica. Le celle "più deboli" durante i processi di carica e scarica subiscono sollecitazioni maggiori rispetto alle altre, che le portano a divenire ancora più deboli, fino a giungere al fallimento precoce delle celle stesse. Il bilanciamento delle celle è un modo per compensare le celle più deboli rispetto alle altre in modo da ottenere una maggiore durata della vita della batteria ed un comportamento più uniforme delle celle, che si traduce in una ottimizzazione delle prestazioni della batteria.

- acquisizione e registrazione dei dati

- storia della batteria

Il monitoraggio e la registrazione di alcuni parametri caratterizzanti la storia della batteria sono altre possibili funzioni del BMS. Ciò è necessario al fine di valutare lo stato di salute della batteria, ma anche per verificare se essa è stata oggetto di abusi. I valori di parametri quali il numero di cicli, le tensioni massime e minime, le temperature massime e le correnti di carica/scarica possono essere registrati per tale scopo.

- autenticazione ed identificazione

Il BMS consente anche la possibilità di registrare informazioni come il nominativo del produttore, la chimica delle celle, la partita di produzione o il numero di serie e la data di fabbricazione che consente la rintracciabilità in caso di guasti.

- comunicazione

E' necessario che il sistema BMS realizzi una comunicazione tra la batteria e il caricabatterie o l'apparecchiatura di prova. In alcune applicazioni potrebbe essere necessario anche un link ad altri sistemi di interfacciamento con la batteria, per il controllo della condizione di quest'ultima. Interfacce di comunicazione sono necessari anche per consentire l'accesso degli utenti alla batteria per modificare i parametri di controllo BMS o per la diagnostica e test. Il BMS pertanto utilizza il CAN bus, che è stato progettato per questo scopo, come principale canale di comunicazione.

Specifica per il BMS

Dal confronto tra i BMS dei due sistemi commerciali 48V che sono stati valutati emerge che il BMS DEL SISTEMA 48V - 20AH conferma di essere rudimentale in quanto, pur svolgendo le funzioni di protezione e bilanciamento, comunica solo se interrogato e riporta, in sola visualizzazione, solo i dati fondamentali (tensione e corrente di pacco, temperatura media di pacco, tensione media di cella, SOC), senza possibilità di acquisizione. Come mostrato nelle pagine precedenti, ciò non ha consentito di fare una diagnosi precisa relativamente all'interruzione sistematica della scarica alla corrente massima. Il BMS Del sistema 48V - 100Ah visualizza ed acquisisce con continuità lo stato del sistema e consente il controllo di tutte le celle: esso viene pertanto assunto come spunto per l'emissione della specifica del BMS per il sistema 48V per mezzo fuoristrada da giardinaggio. Come spiegato, il suddetto sistema batterie sarà costituito da 4 moduli da 12V – 100Ah ciascuno. Ognuno dei 4 moduli avrà il proprio BMS di modulo ed il sistema BMS si completa mediante una unità centrale, detta BMS di sistema (si preferisce evitare le diciture BMS master & slave giacché i BMS di modulo gestiscono delle funzioni (come il bilanciamento delle celle all'interno del modulo stesso) indipendentemente dall'unità centrale, e quindi, non essendo al servizio di questa, non possono essere definiti slave). Si riportano di seguito alcune tabelle di specifica per il BMS del sistema 48V per mezzo fuoristrada da giardinaggio.

FUNZIONI ESEGUIBILI	
Funzione	Note
Protezione	A due livelli: avviso ed allarme
Bilanciamento	Da definire se attivo o passivo, se solo a fine carica
Controllo della carica	
Calcolo del SOC	
Acquisizione dati	Con frequenza impostabile, frequenza max 10 Hz
Comunicazione dati	

GRANDEZZE MONITORATE ED ACQUISITE
SOC
Corrente di pacco
Corrente di modulo
Tensione di modulo
Tensione di cella
Tensione minima di cella
Tensione massima di cella

Vista l'impossibilità di accedere all'interno della cella, si rinuncia al monitoraggio della pressione interna.

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA BATTERIE GESTITE DAL BMS			
Parametro	Valore	Unità	Note
Capacità	100	Ah	
Tensione nominale	51.2	V	
Tensione massima	61.6	V	Allarme overvoltage
Tensione minima	40	V	Allarme undervoltage
No. di celle in parallelo per modulo	0	#	
No. di celle in serie per modulo	4	#	
No. di moduli in parallelo	0	#	
No. di moduli in serie	4		
Corrente di scarica max. continua	300	A	
Corrente di scarica max. picco	500	A	Allarme corrente
Discharge Current peak duration	60	Sec	
Corrente di carica max. continua	100	A	
Operating temperature (min)	-10	°C	Allarme undertemperature
Operating temperature (max.)	+55	°C	Allarme overtemperature

CARATTERISTICHE DELLA CELLA GESTITE DAL BMS			
Parametro	Valore	Unità	Note
Fabbricante	HIPOWER	[abc]	
Modello	HP-PW-100AH	[abc]	
Chimica	LiFePO ₄	[abc]	

Capacità	100	Ah	
Tensione di carica (Max)	3.85	V	Allarme overvoltage
Cell voltage nominal	3.2	V	
Cell cut-off voltage (Min)	2.5	V	Allarme undervoltage

COMUNICAZIONE I/O			
Parametro	Valore	Unità	Note
Tipo di comunicazione	CAN bus	[abc]	
Velocità di comunicazione	125 / 250	kbps	
Output riserva di carica (SOC)	Y	Y/N	
Output thermal management	Y	Y/N	

ELETTRONICA DI POTENZA			
Parametro	Valore	Unità	Note
Contattore principale per disconnessione batteria	Y	Y/N	
Alimentazione 12V	Separata	[abc]	Dal sistema batteria o separata

CONTROLLO DELLA CARICA			
Parametro	Valore	Unità	Note
Potenza di carica	5000	W	
Corrente di carica massima	100	A	
Tipo di controllo della carica	CAN	[abc]	(Analog/PWM/CAN)

13. Conclusioni

L'obiettivo dell'attività era la definizione di batterie modulari agli ioni di litio che, mediante la connessione in serie e/o parallelo di moduli standard, potessero trovare applicazione nel campo delle batterie d'avviamento ed alimentazione ausiliari e della trazione elettrica ed ibrida. Nel settore delle batterie per avviamento ed alimentazione ausiliari, gli studi hanno dimostrato che moduli da 12,8 V nominali realizzati con celle ferro fosfato possono essere una valida alternativa alle batterie al piombo attualmente impiegate. La scelta di tre capacità, 30 – 60 – 90÷100 Ah permette di coprire tutte le applicazioni di autoveicoli convenzionali. Gli studi effettuati hanno inoltre dimostrato che tali batterie, con taglie maggiori (100, 160÷180, 200 Ah) sono di interesse anche per l'impiego come batterie d'avviamento ed alimentazione servizi nell'ambito della nautica da diporto, ove consentono di ottenere maggiore durata e riduzione di peso, ingombro e potenza necessaria per la propulsione rispetto alle corrispondenti batterie al piombo attualmente utilizzate.

L'analisi del campo della trazione con veicoli ibridi ha invece evidenziato che la particolarità delle singole applicazioni non consente la definizione di uno standard che sia universalmente accettabile: ciò ha condotto a rinunciare alla definizione di moduli standard.

Quanto ai veicoli elettrici a batteria, questa standardizzazione è invece possibile ed auspicabile, a tutto vantaggio delle piccole e medie aziende operanti nel settore (autobus, veicoli a 2 e 3 ruote) ove l'industria nazionale ha una posizione di leadership in Europa che occorre preservare con uno sforzo congiunto di ricerca e sviluppo; esiste inoltre un gran numero di aziende, sempre medio-piccole, operanti nei settori dei veicoli non stradali, che utilizzano per i mezzi di loro produzione motorizzazioni diesel ed a benzina. In questo settore, l'adozione di due capacità, 120 e 180 Ah, permette di coprire tutte le applicazioni delle categorie merceologiche considerate. La tecnologia ferro fosfato, già prescelta nel caso delle batterie d'avviamento, è stata confermata anche in questo caso, in virtù della sua sicurezza, il costo inferiore a quello delle altre tecnologie litio ioni, e l'apprezzabile riduzione di peso e volume rispetto alle corrispondenti batterie al piombo.

Mediante l'adozione di poche capacità standard (30, 60, 90-100 Ah, rispettivamente piccola taglia, media taglia e grande taglia) è possibile la realizzazione di altrettanti moduli, che mediante la connessione serie – parallelo possono trovare impiego in tutte le applicazioni suddette. A conclusione dell'attività sono state quindi emesse le specifiche preliminari per il modulo di piccola, media taglia e grande taglia, e del rispettivo BMS (Battery Management System). E' stato dimensionato un sistema batterie 48V – 200 Ah, anch'esso munito di BMS, per una tipologia di mezzo fuoristrada da giardinaggio, da realizzare in una versione preliminare da laboratorio, come dimostratore: la realizzazione di tale sistema richiede l'uso di batterie del costruttore Hipower, che sono in fase di consegna, pertanto l'attività proseguirà appena tali batterie saranno disponibili. E' già disponibile la versione proprototipale, su cui sono stati eseguiti i test riportati nel capitolo 12.

Sempre con la disponibilità delle batterie Hipower, il prossimo anno verranno realizzati i moduli definitivi di piccola, media e grande taglia, con l'aggiunta di ulteriori studi sullo smaltimento termico e sulla sicurezza, più la versione definitiva del sistema modulare per mezzo fuoristrada da giardinaggio.

14. Bibliografia

- [1] "Technology Roadmap Electric and plug-in hybrid electric vehicles", IEA, June, 2011
- [2] M. Conte, "EV, HEV and FCV Activities in Italy – Status as of May 2011" Information Exchange on Electric and Hybrid Vehicles Technologies and Programmes", Istanbul, Turkey, May 25, 2011
- [3] F. Alessandrini, G. B. Appetecchi, M. Conte "Studio di fattibilità tecnica sull'applicabilità delle batterie al litio nelle reti elettriche – Stato dell'arte e limiti scientifici e tecnologici", Report RdS/2010/233
- [4] www.mpoweruk.com
- [5] F. Vellucci, G. Pede, M. Conte, "Experimental Performances of Complete Lithium-ion Battery System, EVS25, November 5-9, 2010, Shenzhen, China
- [6] J. Cao, N. Schofield, A. Emadi, "Battery Balancing Methods: A Comprehensive Review", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5, 2008, Harbin, China
- [7] S. Bauer, "Advanced Battery Tecnology – Aspects of costs, reliability and safety of lithium batteries", 2nd Annual Pan European Conference Battery Testing for Electric Mobility, Berlin, May 2011

ALLEGATO 1 - CONFRONTO TRA BATTERIE DI CHIMICA DIVERSA

Nei paragrafi che seguono si indagheranno le caratteristiche e prestazioni di batterie agli ioni di litio di chimiche diverse con l'obiettivo di mettere a confronto il comportamento delle diverse tecnologie in diverse condizioni di lavoro, evidenziando vantaggi e svantaggi nell'impiego di ognuna di esse al variare di alcuni parametri rilevanti.

L'indagine consisterà nel verificare le caratteristiche di base delle batterie valutandone le prestazioni, al fine di costruirne le curve di funzionamento, di osservare la risposta delle stesse a particolari cicli di utilizzo e di confrontare e verificare tali dati con quelli forniti dai datasheet dei costruttori.

Descrizione delle batterie e delle chimiche messe a confronto.

Batteria di chimica NMC

L'accumulatore elettrochimico preso in considerazione è una cella di tipo High Power litio-ioni con chimica NMC e tensione nominale pari a 3.7 V. Le caratteristiche tecniche dichiarate nel datasheet del costruttore della cella elementare del pacco batterie sono riassunte di seguito.

Alcuni dati definiti in tabella non sono presenti nel datasheet ma sono stati preliminarmente ricavati attraverso i seguenti calcoli:

- L'energia immagazzinata è stata calcolata dalla quantità di carica da essa fornita moltiplicata per la tensione media nel tempo calcolata durante un processo di scarica a corrente costante: $E = VQ_{tot}$.
- Si è considerata come tensione media quella nominale di 3.7 V e il valore di carica totale pari alla capacità nominale;
- La potenza di picco in carica/scarica è stata calcolata considerando la corrente di picco che la batteria può assorbire o erogare moltiplicata per la tensione nominale; mentre la potenza massima in carica/scarica è ricavata dal prodotto della massima corrente continua in carica/scarica per la tensione nominale;
- Il volume è stato ricavato con le formule relative al solido parallelepipedo in questione;

Tensione nominale (V)	3.7
Cut-off (V)	2.7
Tensione massima (V)	4.2 ± 0.03
Capacità nominale [0.5 C, 25 °C, range 4.2 V - 2.7 V]	31 Ah
Massa (kg)	0.860 ± 0.040
Volume(dm ³)	0.39732
Energia immagazzinata (kJ)	412.92
Densità energetica (Wh/l)	288.68
Energia specifica (Wh/kg)	133.37
Temperature funzionamento carica (°C)	0<T<+40
Temperature funzionamento scarica(°C)	-20<T<+60
Numero di cicli di vita [80% DOD; voltage range: 4.15 V – 3.4 V]	> 800
Massima corrente continua di carica (A)	62 (2 C)
Potenza massima in corrente continua di carica (kW)	0.229
Massima corrente continua di scarica (A)	155 (5 C)
Potenza massima in corrente continua di scarica (kW)	0.573
Corrente di picco carica/scarica (A)	310 (10 C)

Potenza di picco carica/scarica (kW)	1.147
Densità di potenza di picco carica/ scarica (kW/l)	2.886
Potenza specifica di picco carica/scarica (kW/kg)	1.337
Forma	Parallelepipedo
Lunghezza (mm)	215 ± 2.0
Altezza (mm)	220 ± 2.0
Spessore (mm)	8.4 ± 0.5

Tabella 38 - Caratteristiche della cella NMC



Figura 71 - Cella litio-ione NMC

Batteria LFP

Le batterie LFP si differenziano da quelle NMC per costruzione e funzionamento, in particolare perché il sale di litio è sciolto in un solvente organico anziché in una matrice polimerica. Con questa tecnologia il volume e il peso sono molto maggiori e l'energia e le potenze specifiche risultano più basse, ma presentano il vantaggio di avere un numero di cicli vita maggiore. Anche in questo caso i dati forniti dai datasheet non sono completi e i valori calcolati in tabella sono stati ricavati come sopra per le NMC.

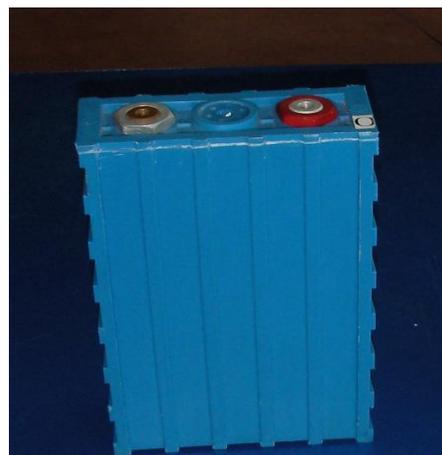


Figura 72 - Modulo litio-ione LFP

Tensione nominale (V)	3.2
Cut-off (V)	2.5
Tensione massima (V)	4.25
Capacità nominale [0.5 C, 25 °C, range 4.2 V - 2.7 V]	40 Ah

Massa (kg)	1.6 ± 0.1
Volume(dm ³)	0.9315
Energia immagazzinata (kJ)	460.8
Densità energetica (Wh/l)	137.41
Energia specifica (Wh/kg)	80
Temperature funzionamento carica (°C)	-25<T<+75
Temperature funzionamento scarica(°C)	-25<T<+75
Numero di cicli di vita [80% DOD]	> 2000
Numero di cicli di vita [70% DOD]	> 3000
Massima corrente continua di carica (A)	120 (3 C)
Potenza massima in corrente continua di carica (kW)	0.384
Massima corrente continua di scarica (A)	120 (3 C)
Potenza massima in corrente continua di scarica (kW)	0.384
Corrente di picco carica/scarica (A)	400 (10 C)
Potenza di picco carica/scarica (kW)	1.280
Densità di potenza di picco carica/ scarica (kW/l)	1.374
Potenza specifica di picco carica/scarica (kW/kg)	0.8
Autoscarica	≤ 3 %
Forma	Parallelepipedo
Lunghezza (mm)	115 ± 1.0
Altezza (mm)	180 ± 1.0
Spessore (mm)	45 ± 1.0

Tabella 39- Caratteristiche singola cella LFP

Osservazioni datasheets NMC-LFP

I dati presenti nelle tabelle sopra mostrano con chiarezza quelle che sono le caratteristiche peculiari dei due esemplari di batterie a litio prese in considerazione.

Gli intervalli di tensione sono quelli comuni ai due tipi di cella: la cella NMC ha un intervallo più ristretto (2.7 V – 4.2 V) rispetto alla LFP (2.5 V – 4.25 V) ma presenta una tensione nominale maggiore (3.7 > 3.2): ciò favorisce un maggior contenuto energetico e di potenza a parità di corrente di scarica.

La Cella LFP presenta una capacità superiore (40 Ah contro i 31 Ah della NMC), entrambe le batterie hanno lo stesso rate di corrente di scarica (10 C corrente di picco, 3C corrente continua) mentre si differenziano sul rate di corrente di carica (2C corrente continua per La cella NMC contro i 3C corrente continua della LFP).

In termini di massa la cella LFP ha un peso 1.86 volte maggiore, valore che influisce negativamente nei termini di energia specifica (133.37 Wh/kg NMC > 80 Wh/kg) e potenza specifica di picco (1.374 kW/kg NMC > 800 kW/kg LFP).

Il confronto dell'ingombro è ancora più eclatante in quanto si osserva che il volume della NMC è fino a 2.55 volte più piccolo, influenzando positivamente in termini di densità energetica (288.6 Wh/l NMC > 137.41 Wh/l LFP) e di densità di potenza di picco (2.886 kW/kg NMC > 1.344 kW/kg LFP).

Tali parametri risultano essere maggiori anche considerando la capacità più elevata della cella LFP, caratteristica che porta ad ottenere, dato gli stessi C rate di scarica, una potenza di picco ed un energia immagazzinabile maggiore per le celle LFP (P=1.280 kW LFP >1.147 kW NMC,

$E=460.8 \text{ kJ LFP} > 412.92 \text{ kJ NMC}$). I valori appena scritti sono molto vicini per il fatto che la tensione nominale della Cella NMC è di un fattore 0.5 maggiore (3.7 V contro 3.2 V).

Inoltre la cella LFP sopporta un intervallo di temperatura più elevato rispetto alla NMC sia in carica che in scarica con range che va da -25°C e 75°C , mentre le celle NMC esaminate non possono essere ricaricate al di sotto di 0°C e al di sopra dei 40°C e devono essere scaricate nel range -20°C e 60°C . La Cella NMC ha bisogno di essere conservata a temperatura non troppo alte per rallentare la degradazione nel tempo.

Il numero di cicli vita che portano la capacità di carica al 80 % sono 2.5 volte maggiori per le celle LFP (2000 cicli circa), numeri che non permettono la realizzazione di entrambe le tecnologie su applicazioni che richiedono molti cicli completi al giorno.

La vita di entrambe le batterie dipende dal tempo trascorso dopo la fabbricazione, con un notevole decadimento delle prestazioni dopo 2-3 anni. Esse vengono quindi fabbricate al momento dell'ordinazione, evitando inutili tempi di attesa in magazzino. I prezzi delle batterie non sono fissi ma diminuiscono al crescere della quantità degli elementi che vengono richiesti, secondo una legge di economia di scala.

Descrizione della procedura e delle apparecchiature adottate.

Materiale utilizzato in laboratorio



1 generatore di corrente continua HP6682A della Hewlett Packard con alimentazione trifase avente una potenza nominale di 5000 W, in grado di erogare una corrente fino a 240 A con una tensione fino a 21 V. La regolazione della tensione e della corrente viene effettuata attraverso un voltmetro e un amperometro interni alla macchina, aventi una risoluzione

rispettivamente di 1mV e di 1mA;



1 carico elettrico regolabile HP 6050A della Hewlett Packard, dotato di tre canali in grado di assorbire 600 W ognuno, dissipando l'energia in calore attraverso resistenze variabili. La macchina è in grado di lavorare a un regime di corrente assorbita costante, regolando il proprio funzionamento sulla base dei dati forniti da un voltmetro e un amperometro interni, aventi una risoluzione di 1mV e di 1mA. Ognuno dei

tre canali può lavorare autonomamente dagli altri, con correnti comprese tra 0 e 120 A e tensioni comprese fra 2 e 60 V, rispettando però il limite di 600 W di potenza massima, con la possibilità di lavorare in sovra potenza per 5 secondi.



1 camera climatica Angelantoni Challenge 250 con una capacità di 224 litri, in grado di mantenere al suo interno una temperatura compresa fra -40 e $+180^{\circ}\text{C}$, con una velocità di riscaldamento di $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e di raffreddamento di $3,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, e una precisione di temperatura di $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$;



1 blocco connettore SCB-68 della National Instruments per dispositivi di acquisizione dati (DAQ), con connettori a 68 pin, che ha il compito di ricevere i segnali provenienti dai trasduttori di tensione, di corrente e di temperatura, di manipolarli e di trasmetterli al computer;



1 PC HP Vectra con processore Intel Pentium II 266 MHz e 128 Mb di memoria RAM, dotato del Software di calcolo Labview, graphical programming for instrumentation, version 4.0.1 della National Instruments;



1 scheda NI AT-MIO-16XE-10 della National Instruments con 16 input analogici a 16 bit per dispositivi di acquisizione dati, con una frequenza di campionamento di 100 kS/s, installata nel computer e in grado di ricevere in ingresso dati dal blocco SCB-68 e di dialogare con il software Labview;



1 termistore Honeywell 192-102DET-A01 per misurare la temperatura superficiale del sistema di accumulo, con resistenza nominale di 1000 Ω a 25 $^{\circ}\text{C}$ e campo di funzionamento da -60 $^{\circ}\text{C}$ a 150 $^{\circ}\text{C}$;



1 Sonda di corrente a effetto Hall HT 200-SBD della LEM, in grado di misurare correnti fino a 200 A con un'incertezza massima dell'1%. La sonda interagisce con l'esterno attraverso 5 conduttori, due dei quali trasmettono il segnale della misura in uscita sotto forma di tensione e gli altri tre necessari per l'alimentazione del componente. La sonda per funzionare ha bisogno infatti di tre valori di tensione in ingresso, pari a 0 V e ± 15 V;



1 Generatore di corrente continua a doppio output GPC-3030D della Instek con due unità di generazione, ognuna delle quali è in grado di erogare al massimo 30V e 3A con una tolleranza sul livello di tensione indicato dello 0.01% + 3mV. Esso viene utilizzato per alimentare la sonda di corrente;



1 Wattmetro delle Yokogawa modello WT103OM con quattro display di visualizzazione delle grandezze corrente e tensione istante per istante; inoltre effettua il calcolo dell'energia immagazzinata o erogata oltre a quello della capacità. Il range di funzionamento è di 600 V max. e 20 A max.



1 Ciclatore di batterie marca ELTRA modello E-8376 con range di funzionamento voltaggio 0-330 V e corrente 0-400 A. E' stato utilizzato per effettuare le prove con le correnti di picco delle due batterie.

1 diodo dotato di alette di raffreddamento, necessario a garantire che non ci siano correnti di ritorno al generatore;

1 Termometro a mercurio per il controllo delle temperature;

Cablaggio necessario per collegare i componenti fra loro;

Energia elettrica da rete (230/400 V e 50 Hz) in regime trifase per la camera climatica e per il generatore HP 6682A e monofase a 230 V per gli altri componenti;



1 bilancia di precisione Gibertini 64444 TMB, con risoluzione di 1g, impiegata per la determinazione della massa dei due sistemi di accumulo.

Configurazione utilizzata per le misurazioni

Gli intervalli di tensione richiesti per le prove sui modulo agli ioni di litio appartengono allo stesso ordine di grandezza e rientrano all'interno del range di funzionamento delle apparecchiature presenti in laboratorio. Anche l'intensità delle correnti con cui sono state effettuate le prove è simile tra i due componenti, pertanto è stato possibile svolgere le acquisizioni su di essi con la stessa strumentazione e configurazione. Precisamente per le correnti al di sopra dei 100 A si è fatto ricorso all'utilizzo del ciclatore, mentre per correnti più basse si sono utilizzati tutti gli strumenti precedentemente illustrati con la seguente disposizione (vedere figura più avanti).

L'accumulatore viene sistemato durante tutte le acquisizioni di dati nella camera climatica. Il passaggio dei cavi che trasportano tra l'interno e l'esterno dell'ambiente a temperatura controllata le correnti di carica e scarica e i segnali di misura avviene attraverso un foro sulla parete laterale della camera climatica, e gli spiragli d'aria vengono sigillati attraverso un apposito tappo in materiale gommoso, illustrato di fianco.

I circuiti elettrici necessari per le prove possono essere pensati come suddivisi in due sistemi distinti: uno funzionale all'acquisizione e alla trasmissione dei dati e l'altro necessario per fornire o prelevare energia all'accumulatore. Quest'ultimo circuito è caratterizzato da una configurazione parallelo fra la macchina di generazione, quella di carico e l'accumulatore, effettuata tramite cavi corti e di larga sezione. Ciò viene realizzato semplicemente collegando fra loro tutti i morsetti positivi e, separatamente, tutti quelli negativi, come illustrato nella parte inferiore della figura sotto. In tal modo è possibile utilizzare alternativamente il generatore e il carico per fornire o prelevare energia. Il conduttore che parte dal morsetto positivo del generatore viene messo in serie a un diodo posto nel verso appropriato per fare in modo che la corrente possa uscire dal generatore ma non vi possa entrare quando esso è disattivato.



Il circuito di acquisizione dati è invece illustrato nella parte superiore della figura fa capo al blocco connettore SCB-68 a cui arrivano tre segnali: uno per la temperatura, uno per la tensione e uno per la corrente. Il segnale di temperatura deriva da una coppia di conduttori corti e con bassa resistenza a cui è connesso il termistore, che viene sorretto da un sostegno per essere mantenuto in contatto solidale con un punto centrale della superficie esterna del componente. Il segnale di tensione viene prelevato attraverso due conduttori, direttamente agli elettrodi del componente e inviato direttamente in ingresso al connettore SCB-68. Il segnale di corrente viene prelevato da due conduttori connessi alla sonda amperometrica, che è collocata in modo da misurare la corrente che fluisce attraverso il conduttore che porta e preleva energia dal morsetto positivo del componente, in un punto abbastanza vicino al componente stesso. L'alimentazione della sonda viene effettuata dal doppio generatore ausiliario, impostando su entrambi i canali una tensione costante di 15 V e collegando il morsetto positivo dell'uno con quello negativo dell'altro. Così facendo si fa in modo che ai 4 morsetti del generatore si abbiano 3 livelli di tensione, ossia 0 V, -15 V e +15 V, che sono le tensioni che la sonda di corrente richiede sui conduttori di alimentazione. Sia il segnale di corrente che quello di tensione è collegato al Wattmetro che ne visualizza i valori ed istante per istante calcola la capacità e l'energia. Il blocco SCB-68 acquisisce i dati e li trasmette attraverso un bus alla scheda NI AT-MIO-16XE-10 installata all'interno dello chassis del computer.

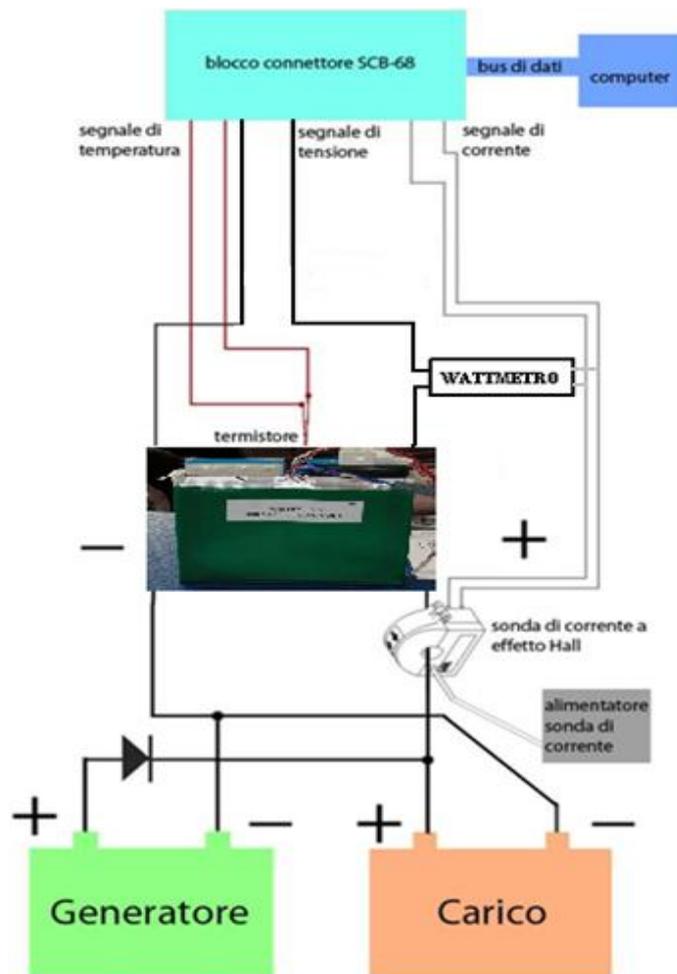


Figura 73 - Disposizione degli strumenti di misura

Il software per l'elaborazione dei dati

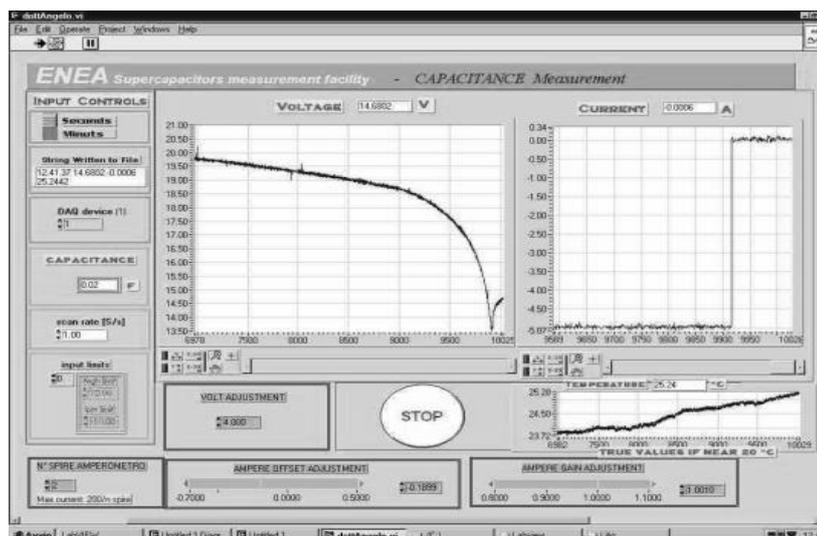


Figura 74 - Interfaccia grafica del software implementato in Labview per l'elaborazione e la registrazione dei dati

I dati vengono elaborati e registrati attraverso un programma implementato in Labview, che consente di acquisire i segnali che arrivano alla scheda e di elaborarli, al fine di poter visualizzare i quattro parametri di nostro interesse, ossia corrente, tensione, temperatura e tempo. Questo programma è anche in grado di mettere su grafico i dati acquisiti, per poterli controllare in tempo reale, e di registrarli su foglio elettronico. Il programma in questione è stato realizzato dai ricercatori ENEA appositamente per il sistema di acquisizione in uso. Esso presenta un'interfaccia grafica intuitiva e ben strutturata, illustrata in figura, che mostra i grafici della tensione, della corrente e della temperatura in funzione del tempo. Attraverso un comando è possibile configurare manualmente l'area di visualizzazione dei grafici per osservare le curve che il programma traccia nella scala che si desidera; essa viene altrimenti stabilita in modo automatico. Vi sono alcune caselle dell'interfaccia grafica in cui bisogna fornire dei valori in ingresso. Essi sono:

- Il fattore moltiplicativo della tensione, che è pari al rapporto di riduzione del sistema di resistenze che è stato utilizzato per diminuire la tensione.
- La frequenza desiderata per l'acquisizione dei dati, fornita in scansioni al secondo (S/s).
- Il parametro additivo di offset per la taratura del segnale di corrente.
- Il parametro moltiplicativo di gain per la taratura del segnale di corrente.
- Il percorso tra le periferiche del computer dove registrare, se lo si desidera, il file contenente il foglio elettronico delle misure.

Il programma è stato implementato in ambiente Labview utilizzando una struttura a blocchi simile a quella del noto software Simulink. In questo programma sono stati inseriti tutti i parametri dei sistemi utilizzati per la misurazione e per la trasmissione dei dati. Un algoritmo sfrutta questi parametri per convertire i dati in ingresso nelle misure vere e proprie e per registrare queste ultime nelle condizioni imposte dall'utente attraverso l'interfaccia grafica.

Metodologia utilizzata

Le procedure sono finalizzate alla determinazione delle caratteristiche e del comportamento delle batterie nel campo degli alti valori di potenza richiesti dai cicli di marcia, come ad esempio nelle accelerazioni e nelle salite del veicolo, e si rifanno alla letteratura tecnica sull'argomento e nello specifico alla metodologia EUCAR "Specification of test procedures for hybrid electric vehicle traction batteries" ed in parte la "Procedura di prova comune per il gruppo di coordinamento CNR-ENEA-RSE" (in fase di definizione), per la determinazione dei parametri di base che caratterizzano il comportamento.

Una volta noti i parametri costruttivi del componente in prova, al fine di rispettarne i limiti per non danneggiare la cella, i parametri che verranno registrati sono la corrente continua che l'attraversa, la tensione continua a cui è sottoposta, il tempo e la temperatura di esecuzione delle prove. Per effettuare tale misurazione si è sistemato il componente nella camera climatica Angelantoni e seguendo normativa EUCAR si sono fatte le acquisizioni a temperatura ambiente, a 0 °C e a 40 °C.

Il termistore è stato messo a contatto con la struttura esterna del componente in un punto ad esso centrale. Ogni volta che è stata fatta una prova ad una certa temperatura, si è avuta l'accortezza di lasciar giacere la batteria alla stessa temperatura per le precedenti 12 ore, al fine di correggere possibili errori sistematici dovuti all'inerzia termica del componente.

Inizialmente la batteria è stata sottoposta a vari cicli di formazione in modo da essere sicuri che si sia realizzato una adeguata stabilizzazione della stessa. La batteria è stata considerata

“formata”, in accordo con le procedure EUCAR, quando la capacità di scarica durante due consecutive scariche non varia più del 3 % tra valori ottenuti.

Inoltre prima di ogni prova è stato effettuato sulla cella un Ciclo Standard, consistente nella scarica a C/2, nella pausa di 1 h e nella successiva ricarica a C/2, per portare la cella alle stesse condizioni iniziali per ogni prova effettuata e ridurre gli errori.

Di seguito si riportano tutte le misure effettuate separatamente per la batteria Cella NMC ed LFP e in appendice C tutte le tabelle, presenti nelle procedure EUCAR, compilate dei valori reali riscontrati durante le prove per entrambe le batterie.

Energia e potenza specifica, densità di energia e di potenza.

Misurazione della massa e del volume

Le misurazioni della massa sono state effettuate in tutte le prove attraverso la bilancia di precisione presente in laboratorio ENEA.

CELLA NMC

Il peso rilevato della singola cella è 0.85 kg, il volume è 0,397 dm³.

CELLA LFP

Il peso rilevato è 1.557 kg, il volume è 0,931 dm³.

Capacità a differenti regimi di scarica e temperature.

La capacità è il parametro di riferimento dello stato di attività della cella ed un cambiamento, rispetto ai dati di fabbrica, da importanti informazioni riguardo alla disponibilità di energia e all'invecchiamento delle celle. Nel caso di un pacco di batterie le capacità delle celle dovrebbero essere simili, per evitare un comportamento non uniforme, che comporterebbe una distribuzione non omogenea della tensione in ogni cella con diminuzione delle prestazioni del pacco.

La rilevazione della capacità è stata effettuata secondo quanto imposto dalla normativa Eucar. In ogni rilevazione il componente è stato sottoposto a un ciclo completo di carica e scarica in cui sono stati registrati con frequenza di 1 acquisizione al secondo i valori di tensione e corrente ai morsetti del componente.

La capacità è pari a:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$

Il calcolo in Ah quindi risulta essere semplice e può essere effettuato in due modi:

- moltiplicando il valore medio della corrente e il tempo trascorso in h durante la scarica;
- effettuando la sommatoria delle correnti e dividendo per 3600 (secondi che definiscono l'ora).

La carica è stata effettuata a corrente costante pari a C/2 fino al limite di soglia della tensione dei due componenti, per poi procedere a tensione costante fino a quando la corrente di ingresso si è ridotta a meno di 0.5 A. Successivamente si è effettuato la scarica a corrente costante a differenti C rate. In questo modo è stato possibile calcolare il rendimento di carica come rapporto tra la quantità di carica uscente e quella in ingresso durante un ciclo completo.

Tutte le prove sopra descritte sono state effettuate a temperatura ambiente di circa 23°C, mentre a temperatura di 0°C e 40°C si è effettuata la prova considerando una corrente di scarica pari a 1 C.

CELLA NMC

Dalla formazione della Cella NMC è risultato che la capacità che è in grado di erogare la cella (alle stesse condizioni ambientali, corrente di scarica e range di tensione definiti dal costruttore) risulta essere superiore a quella dichiarata dai datasheet: ad ogni prova di formazione si è ottenuto una capacità superiore ai 32 Ah, valore che cmq non risulta essere lontano dai 31 Ah di capacità dichiarata.

Essendo questo componente limitato alla corrente continua di scarica 5 C, si sono effettuate scariche per i valori di corrente ($C/2 = 15.5 \text{ A} - 1C = 31 \text{ A} - 3C = 93 \text{ A} - 5C = 155 \text{ A}$) ottenendo le seguenti capacità:

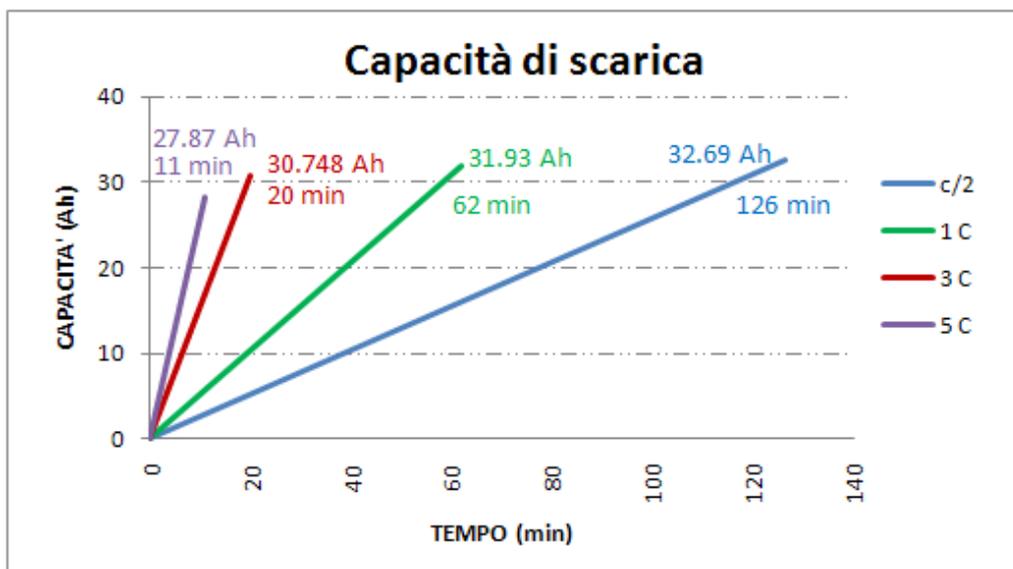


Figura 75 – Capacità a differenti regimi di scarica, in funzione del tempo

Dalla figura sopra è evidente che la carica erogata dalla batteria dipende dal regime di scarica a cui essa viene sottoposta. All'aumentare della corrente di scarica diminuisce la quantità di carica estraibile dal componente. In realtà non si hanno variazioni della quantità di carica totale immagazzinata; la riduzione della carica è soltanto apparente e dovuta al fatto che, se si richiedono alte correnti, la resistenza interna provoca cadute di tensione tale da ridurre la quantità di carica che viene effettivamente erogata. Un diagramma che tiene conto di ciò è quello di Peukert in cui si dispongono sulle ascisse le correnti richieste e sulle ordinate le quantità di cariche estratte a quei regimi.

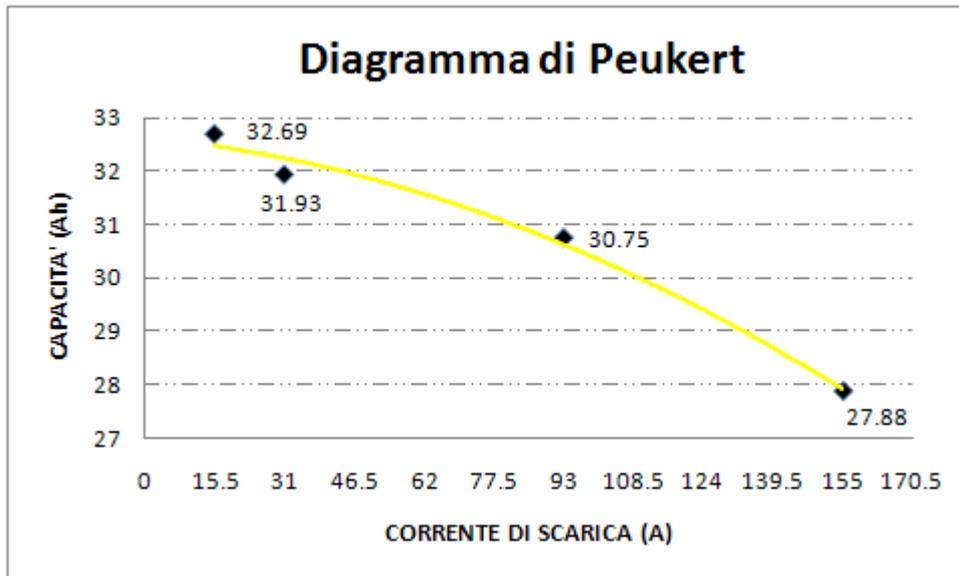


Figura 76 – Capacità a differenti regimi di scarica

È evidente che all'aumentare del C/rate di scarica diminuisce anche il tempo necessario per effettuarla. Tale tempo dovrebbe essere proporzionale alla riduzione dello C/rate ma non si ottiene questa linearità tra le due grandezze proprio perché avviene la riduzione fittizia della capacità.

È possibile quindi definire un rendimento di carica/scarica (o rendimento Coulombiano) per rappresentare queste perdite di capacità. Nel nostro caso il rendimento è misurato rapportando la quantità di carica estratta al determinato C/rate rispetto alla quantità di carica prima inserita sempre alla corrente C/2 ottenendo:

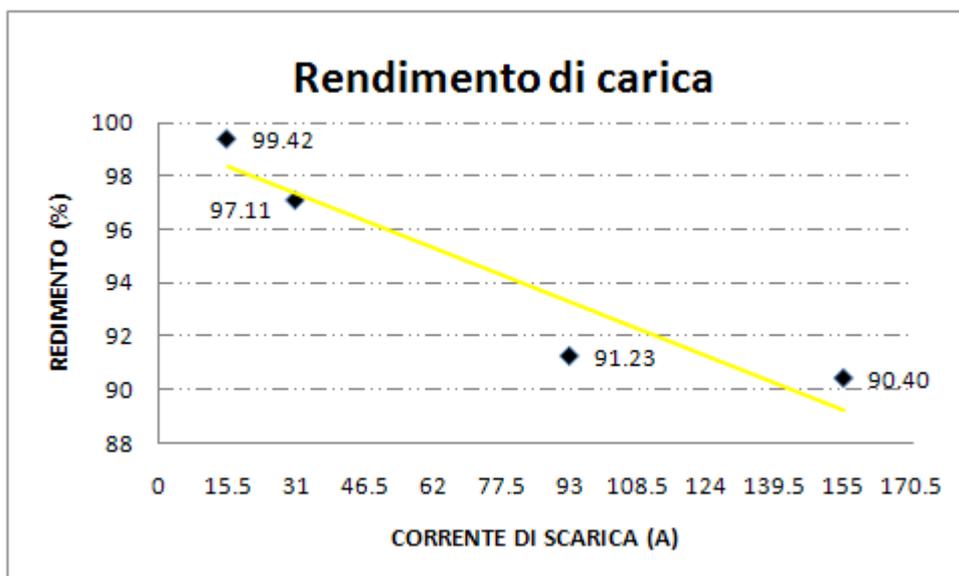


Figura 77 – Rendimento coulombiano a differenti regimi di scarica

Un altro valore che varia in funzione della corrente di scarica è la tensione media, quest'ultima diminuisce all'aumentare della corrente di scarica come mostrato sotto:

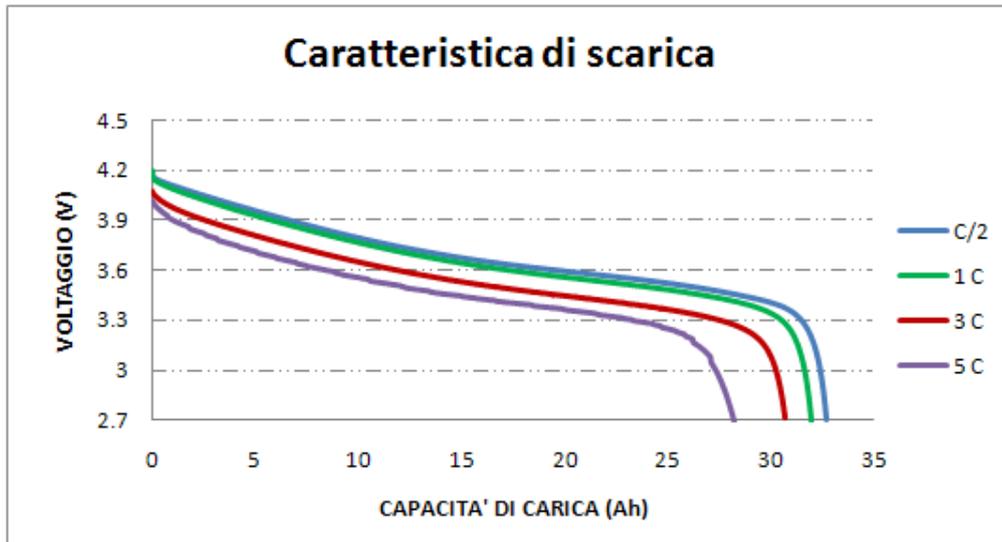


Figura 78 – Curve di scarica per diversi C-rate

Le varie tensioni medie ai differenti C rate sono di seguito riportate:

C/2 → 3.68 V

1 C → 3.65 V

3 C → 3.55 V

5 C → 3.48 V

Si riporta nel grafico seguente l'andamento lineare della variazione della temperatura, misurata attraverso il resistore a contatto con il componente, dove è evidente un aumento del ΔT all'aumentare della corrente (le perdite sono proporzionali al quadrato di esse):

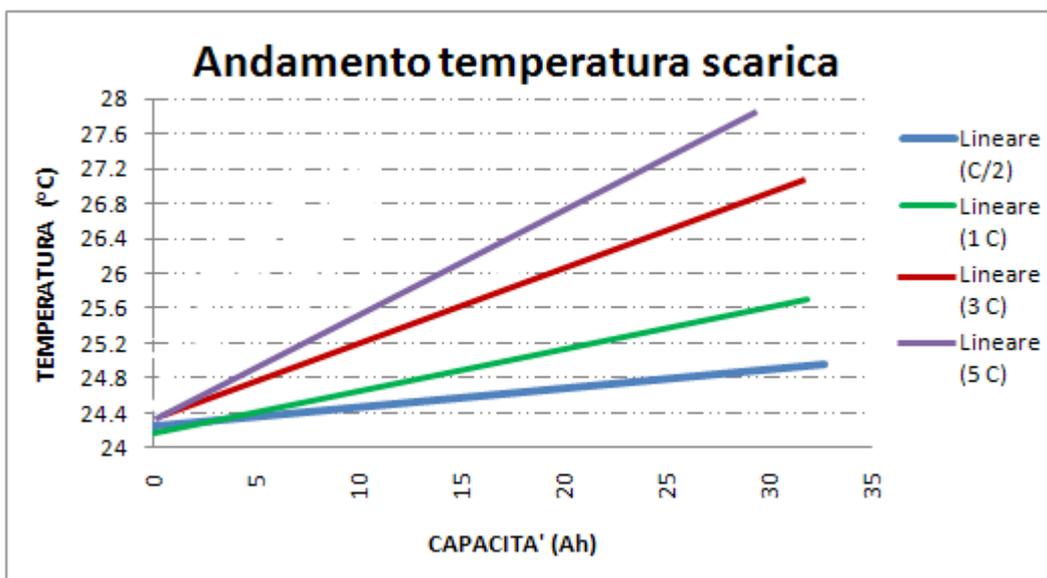


Figura 79 – Andamento della temperatura in scarica

È stata inoltre effettuata la misura della capacità a diverse temperature (0°C, 23°C e 40°C) grazie all'utilizzo della camera climatica e a corrente costante 1C (31 A) ottenendo i seguenti valori:

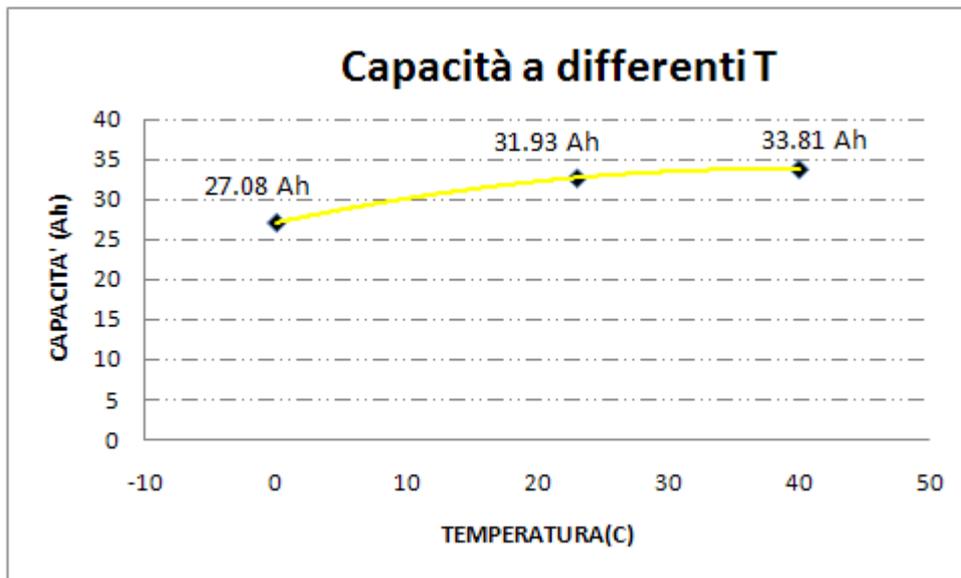


Figura 80 – Capacità a differenti temperature

I rendimenti di carica invece ottenuti alle differenti temperature sono illustrati nel diagramma della pagina successiva.

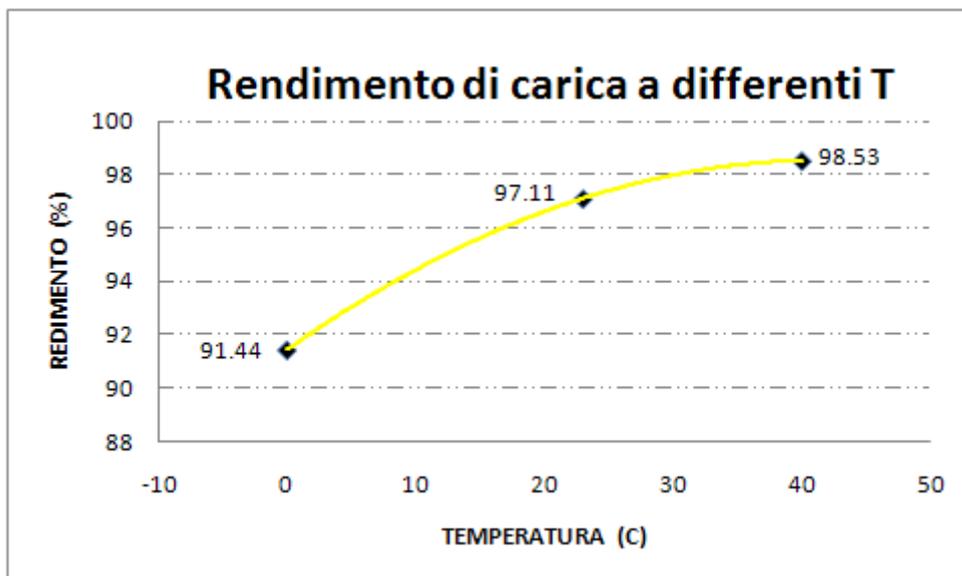


Figura 81 – Rendimento coulombiano a differenti temperature

Dai grafici sopra si evince la sensibilità delle batterie alla temperatura di funzionamento. Dal grafico del rendimento si evince che esse sono progettate per dare migliori prestazioni globali tra i 20-25°C, ma forniscono un aumento di carica fino a temperature di 50°C come è evidente nel grafico precedente. Per temperature inferiori ai 23°C presentano una perdita di carica di

circa 0.66 % per ogni grado di raffreddamento ed inoltre il rendimento di carica registrato alla temperatura di 0°C cala in maniera evidente.

Si riportano infine l'andamento della tensione in funzione della capacità alle differenti temperature (scarica costante 1C):

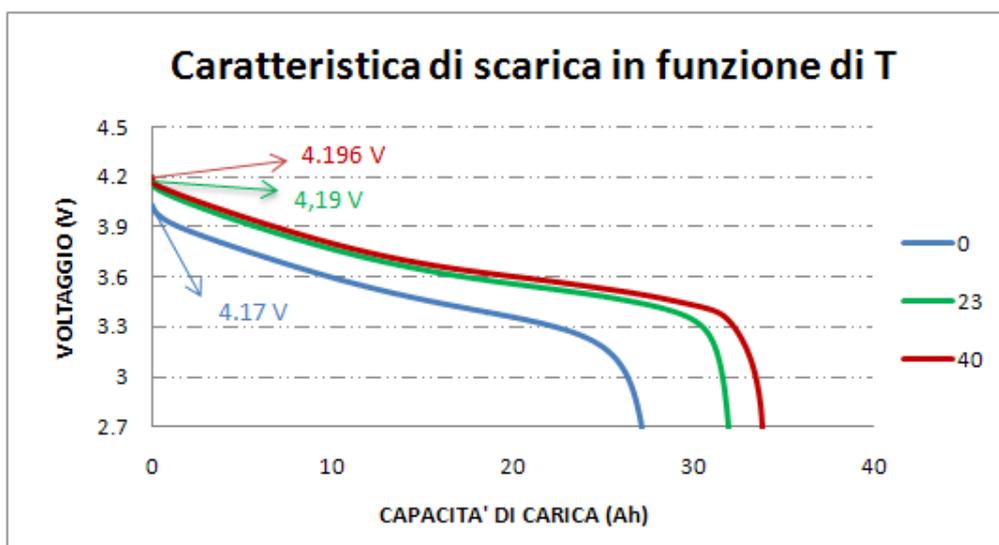


Figura 82 – Curve di scarica @1C per differenti temperature

La tensione che si è registrata prima della scarica diminuisce al diminuire della temperatura, come i valori di tensione media riportati di seguito:

TEMPERATURA 0°C → 3.50 V

TEMPERATURA 23°C → 3.65 V

TEMPERATURA 40°C → 3.67 V

LFP

La capacità che è in grado di erogare la cella (alle stesse condizioni ambientali, corrente di scarica e range di tensione definiti dal costruttore) risulta essere molto superiore a quella dichiarata dai datasheet, si è infatti riscontrata una capacità di circa 48 Ah contro i 40 Ah dichiarati dalla casa madre. Si è pensato quindi di effettuare la formazione su altre due batterie della stessa serie e il valore della capacità ottenuto è risultato essere sempre di 48 Ah circa.

In questo caso la corrente continua di scarica è di 3 C, avendo una capacità dichiarata nel datasheet di 40 A, si sono effettuate le prove a 20, 40, 80 e 120 A (C/2, 1C, 2C e 3C) ottenendo i seguenti risultati:

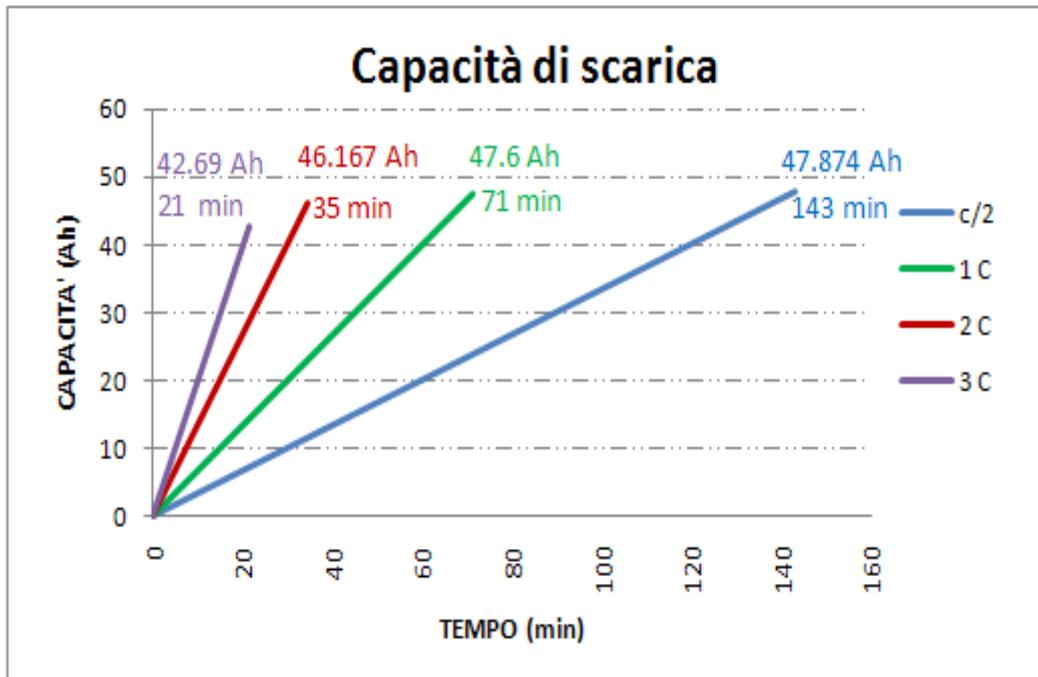


Figura 83 – Capacità in funzione del tempo, a differenti regimi di scarica

Anche in questo caso è evidente la riduzione della capacità in funzione della corrente di scarica e si riporta nella pagina seguente il diagramma di Peukert allo stesso modo con cui è stato costruito per la cella NMC.

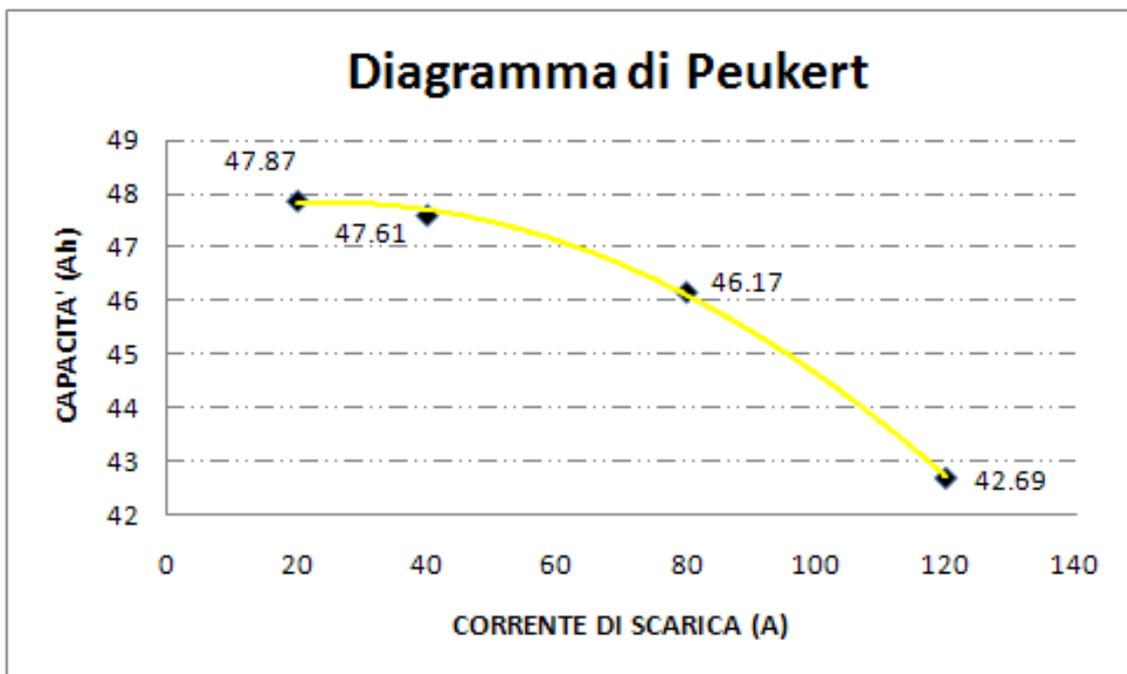


Figura 84 – Capacità in funzione del regime di scarica

Il rendimento di carica è stato calcolato in egual modo a come definito per le NMC:

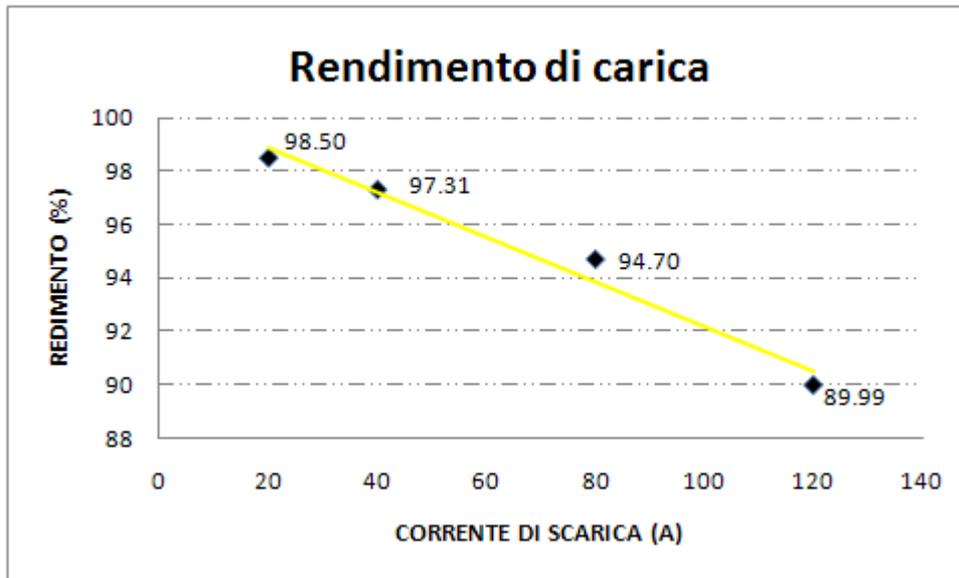


Figura 85 – Rendimento coulombiano in funzione della corrente di scarica

Si riporta di seguito l'andamento della tensione ai vari C rate:

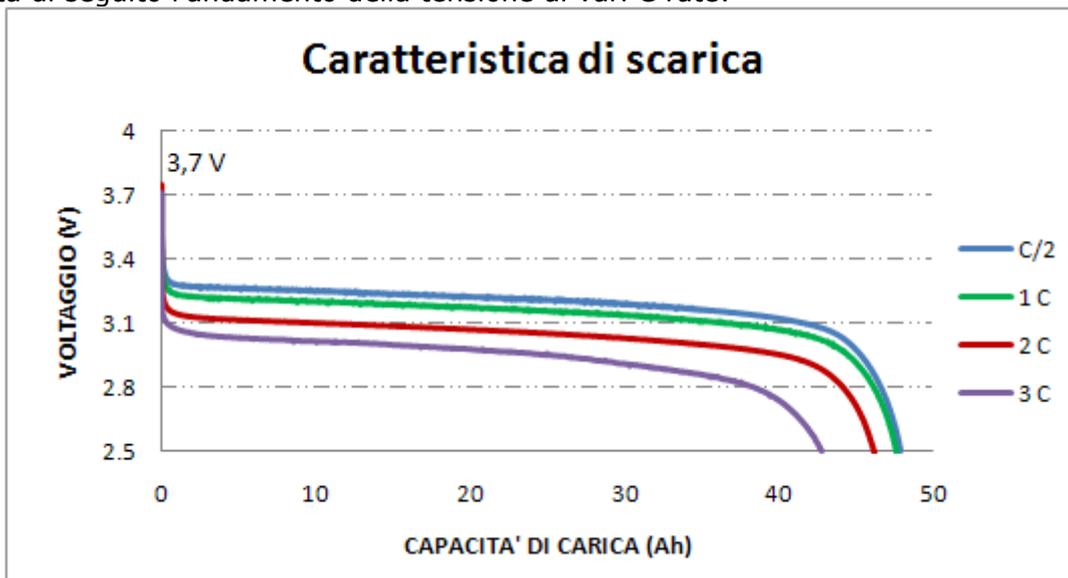


Figura 86 – Rendimento coulombiano in funzione della corrente di scarica

Le varie tensioni medie ai differenti C rate sono di seguito riportate:

C/2 → 3.18 V

1C → 3.13 V

2C → 3.03 V

3C → 2.93 V

Si riporta nel grafico della pagina seguente l'andamento lineare della variazione della temperatura, misurata attraverso il resistore a contatto con il componente, dove è evidente un aumento del ΔT all'aumentare della corrente (le perdite sono proporzionali al quadrato di esse).

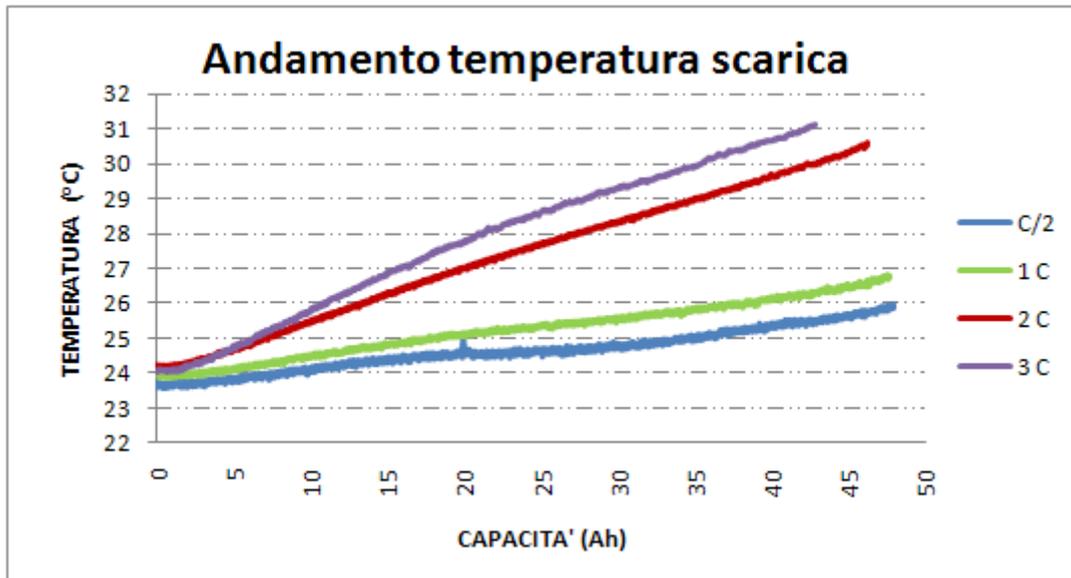


Figura 87 – Andamento della temperatura durante la scarica

Anche in questo caso sono state effettuate prove a differenti temperature. Nel grafico seguente si nota che la prova a 40°C è risultata poco attendibile.

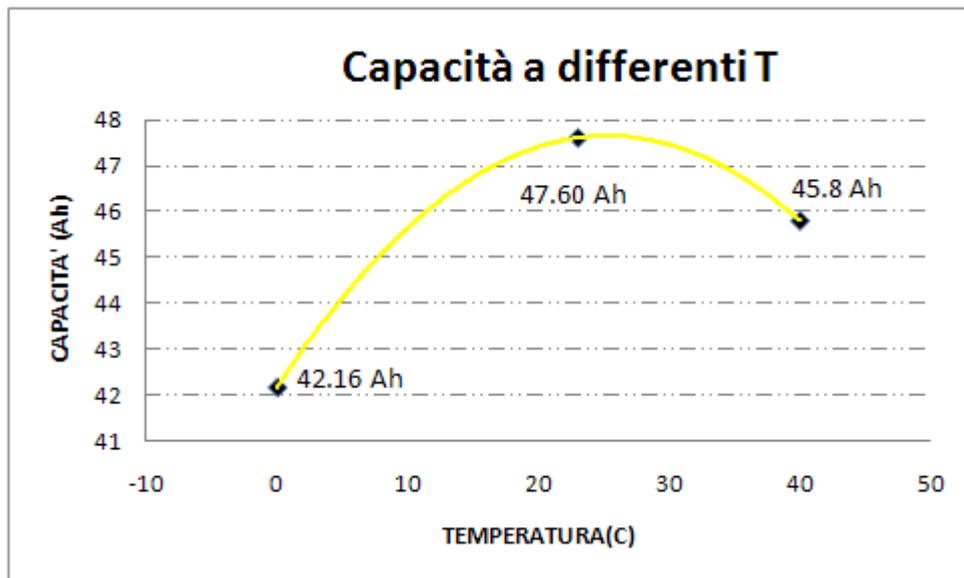


Figura 88 – Andamento della capacità in funzione della temperatura

Il rendimento di carica è pressoché rimasto costante tra la T ambiente e i 40°C, mentre per le temperature più basse si ha una perdita di carica di circa 0.5 % per ogni grado di raffreddamento ed inoltre, come per le NMC, il rendimento di carica registrato alla temperatura di 0°C diminuisce in maniera evidente.

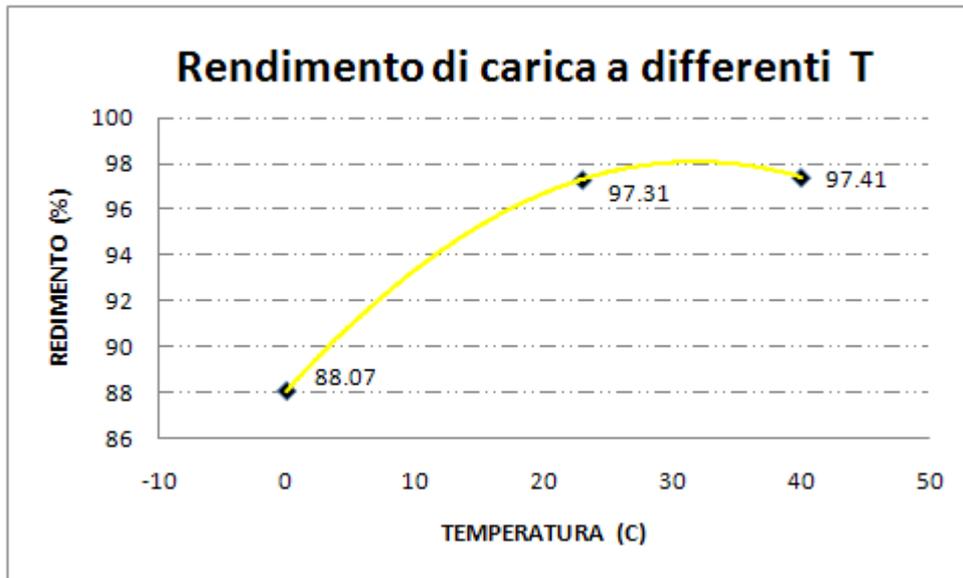


Figura 89 – Rendimento colombiano a differenti temperature

Si riportano infine nella pagina seguente l'andamento della tensione in funzione della capacità alle differenti temperature (scarica costante 1C).

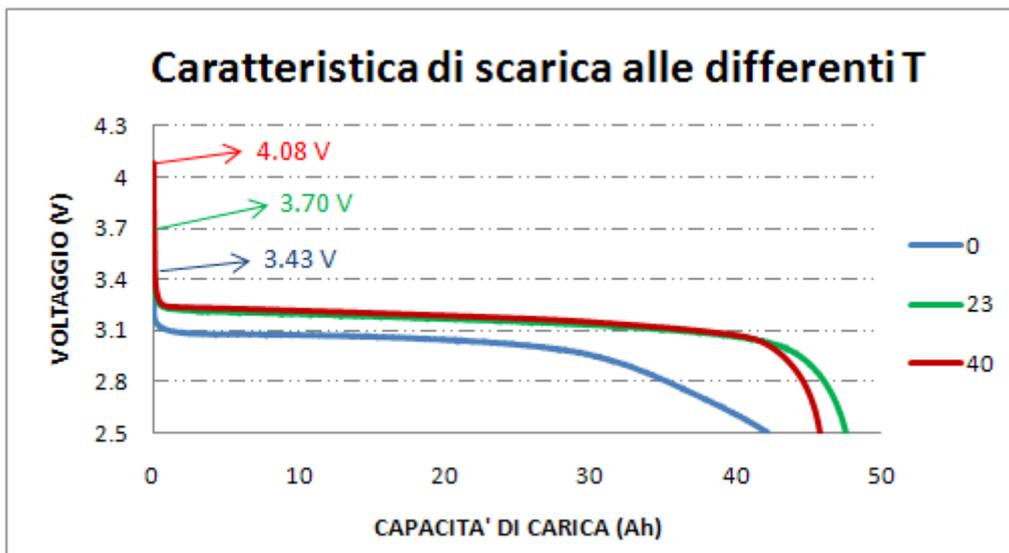


Figura 90 – Curve di scarica alle differenti temperature

La tensione che si è registrata prima della scarica diminuisce al diminuire della temperatura, come i valori di tensione media riportati di seguito:

TEMPERATURA 0°C → 2.98 V

TEMPERATURA 23°C → 3.13 V

TEMPERATURA 40°C → 3.15 V

Determinazione dell'energia

La quantità di energia accumulata nella batteria per unità di massa (o di volume) è, di gran lunga, il fattore più limitante le prestazioni di un veicolo elettrico rispetto ad uno convenzionale a motore termico.

Infatti mentre un kg di benzina contiene oltre 12 kWh di energia, le batterie contengono decimi di kWh in un kg: per fornire un' accettabile autonomia, il peso delle batterie deve quindi costituire una parte consistente di tutto il peso del veicolo (25 % circa per un veicolo elettrico) con evidenti riflessi sul progetto del telaio e della componentistica di sicurezza (freni, sospensioni).

Le misurazioni di queste grandezze sono state effettuate con le medesime prove con le quali si sono effettuate le misure di capacità. Anche in questo caso la densità di energia e l'energia specifica non sono parametri assoluti, unicamente definiti da un numero, ma dipendono dalla modalità (la corrente di scarica) e dalle condizioni (temperatura, vita della batteria) in cui l'energia viene erogata, esattamente come avviene per la capacità.

L'energia è calcolata attraverso il seguente integrale:

$$\Delta E = \int_{t_1}^{t_2} V \cdot I dt$$

Anche per l'energia è possibile definire il rendimento che è il rapporto tra la l'energia fornita durante la carica e quella che invece viene successivamente scaricata: il suo complemento ad uno definisce la frazione di energia che viene dissipata in perdite interne alla cella.

CELLA NMC

Si sono ottenuti i seguenti valori di energia ai differenti C rate di scarica:

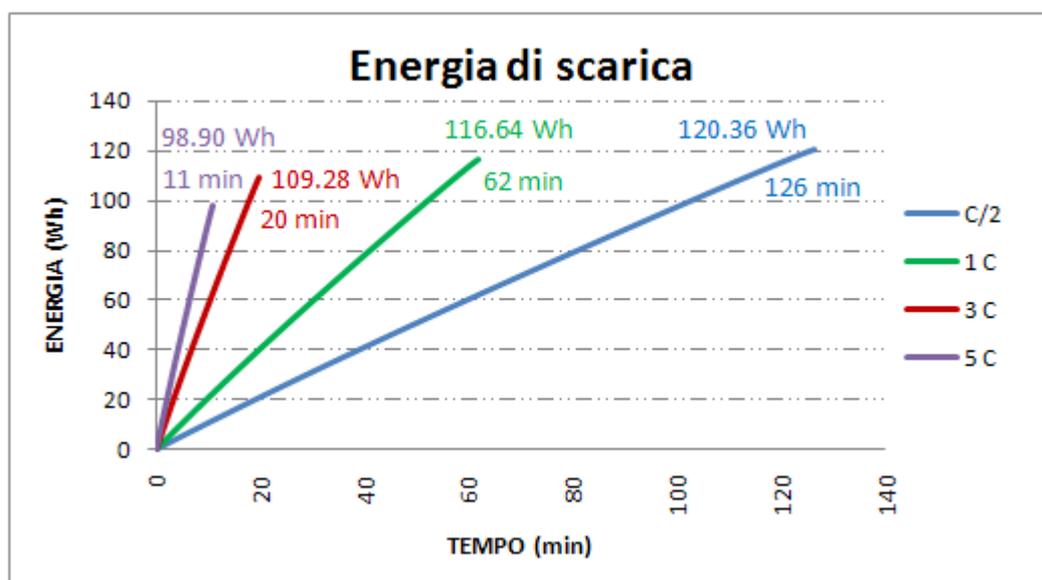


Figura 91 – Energia di scarica ai vari C-rate in funzione del tempo

L'andamento dell'energia in funzione della temperatura è riportata di seguito:

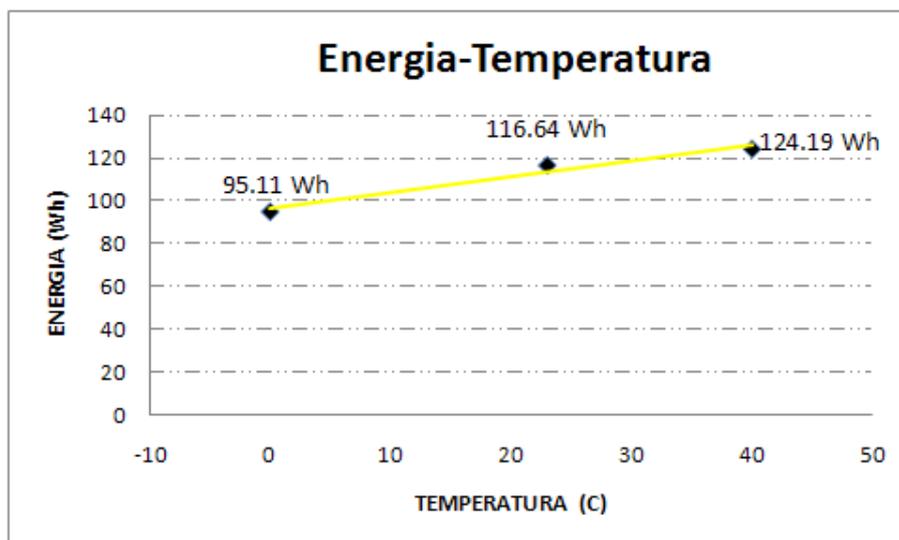


Figura 92 – Energia di scarica in funzione della temperatura

Dai grafici si nota che l'energia accumulata presenta un andamento simile a quello della capacità: aumenta all'aumentare della corrente di scarica e aumenta all'aumentare della temperatura secondo una legge quasi lineare.

Simile è la caratteristica del rendimento energetico rispetto a quello di carica: esso assume però valori molto più piccoli come si evince dai grafici della pagina seguente costruiti a diverse correnti di scarica

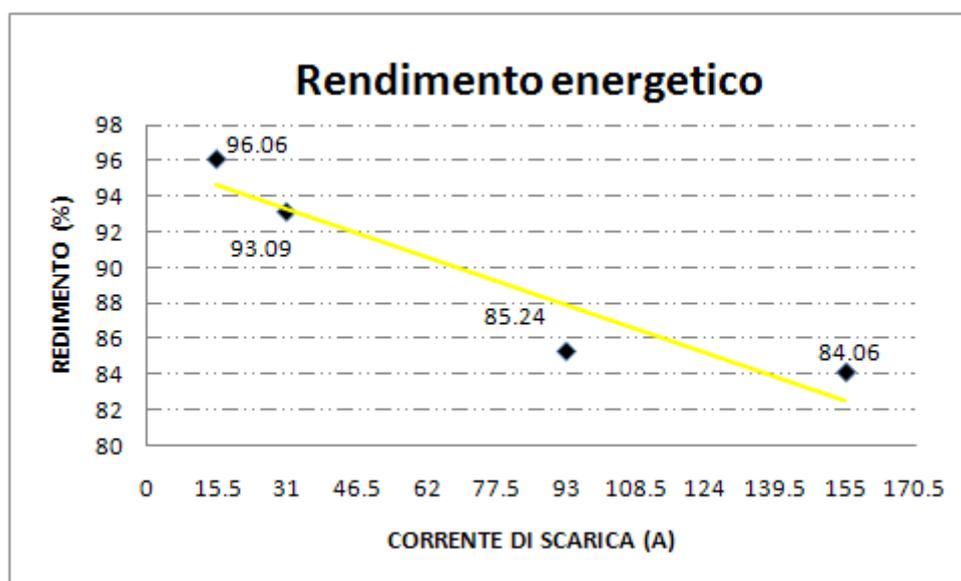


Figura 93 – Rendimento energetico ai vari C-rate

e a diverse temperature considerando la corrente di scarica pari a 1C

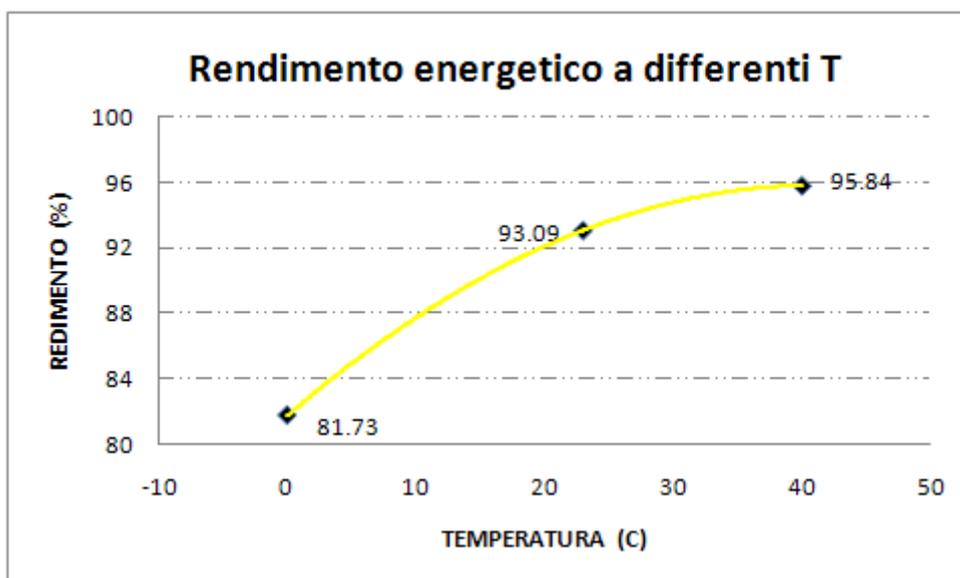


Figura 94 – Rendimento energetico alle differenti temperature

Dividendo l'energia per il valore del volume prima calcolato (0.39732 l) si ottiene la densità energetica, mentre dividendo per il valore della massa della cella (0.849 kg) si ottiene l'energia specifica: nelle tabelle della pagina seguente tali parametri sono riportati sia in funzione dello C rate che in funzione della temperatura considerando la scarica 1C.

Correnti di scarica (A)	Energia Wh	Energia specifica Wh/kg	Densità energetica Wh/l
15.5 (C/2)	120.36	141.77	302.93
31 (1 C)	116.64	137.39	293.57
93 (3 C)	109.28	128.72	275.04
155 (5 C)	98.9	116.49	248.92

Tabella 40 - Energia specifica e densità energetica a diversi C rate

Temperatura (Celsius)	Energia Wh	Energia specifica Wh/kg	Densità energetica Wh/l
0	95.11	112.02	239.38
23	116.64	137.39	293.57
40	124.19	146.28	312.57

Tabella 41 - Energia specifica e densità energetica a diverse temperature

Dalle due tabelle sopra si nota un aumento di energia in termini di peso e volume e dai valori ottenuti risulta che questa tipologia di batteria risulta avere un accettabile autonomia su un veicolo ibrido garantendo un peso ed un occupazione di volume basso.

LFP

Si riportano di seguito i grafici, come per la Cella NMC, costruiti per la cella LFP:

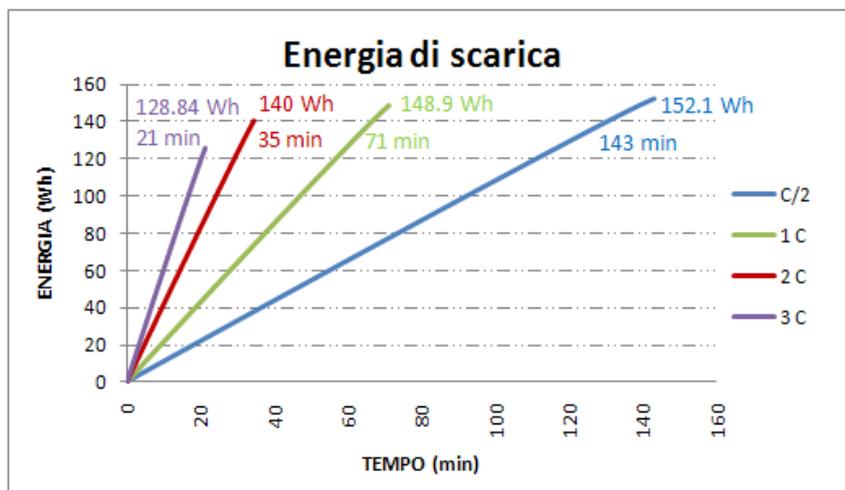


Figura 95 – Energia di scarica ai vari C-rates in funzione del tempo

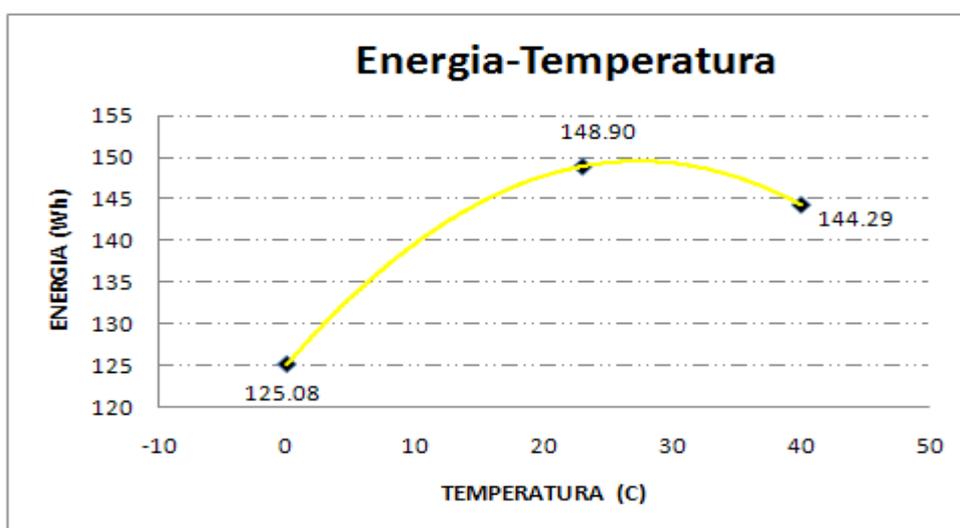


Figura 96 – Energia di scarica in funzione della temperatura

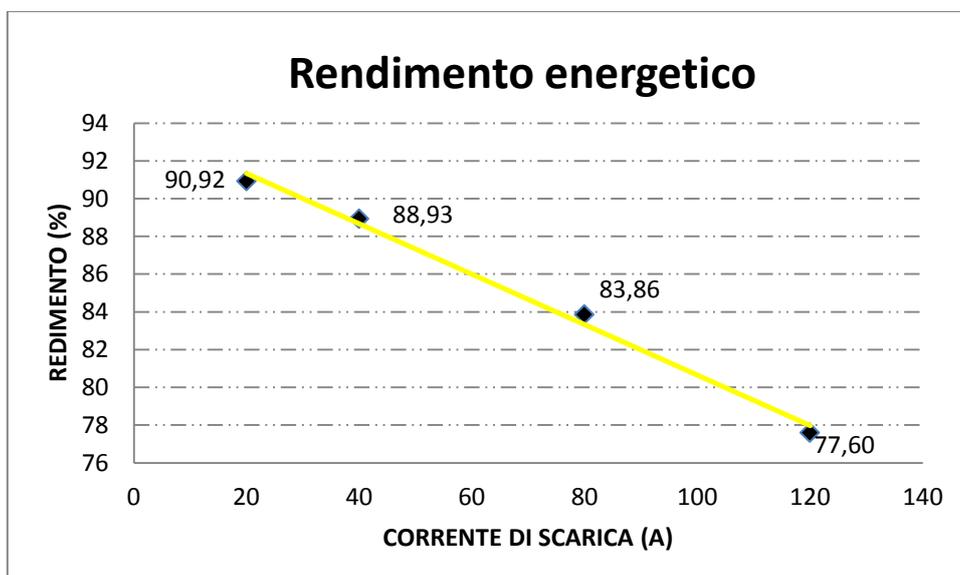


Figura 97 – Rendimento energetico in funzione della corrente di scarica

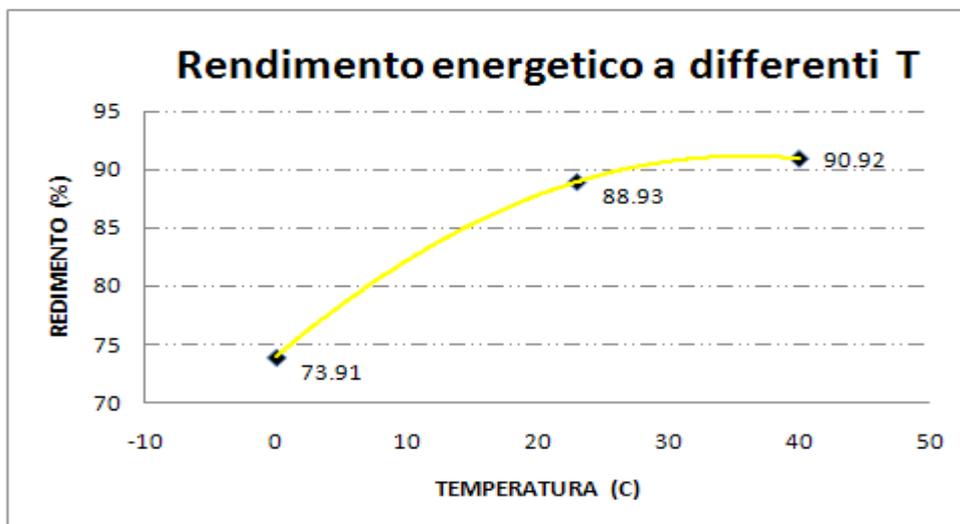


Figura 98 – Rendimento energetico in funzione della temperatura

Nel caso della cella LFP il peso è rilevante (1.557 kg) e anche il volume occupato non è piccolo come quello della cella NMC (0.9315 l contro 0.39732 l), per cui i valori in termini di massa o volume si riducono drasticamente.

Correnti di scarica (A)	Energia Wh	Energia specifica Wh/kg	Densità energetica Wh/l
20 (C/2)	152.1	97.04	163.28
40 (1 C)	148.9	95.73	159.85
80 (2 C)	140	89.92	150.3
120 (3 C)	128.84	82.73	138.27

Tabella 42 - Energia specifica e densità energetica a diversi C rate

Temperatura (Celsius)	Energia Wh	Energia specifica Wh/kg	Densità energetica Wh/l
0	125.08	80.33	134.3
23	148.9	95.73	159.85
40	144.29	146.28	154.9

Tabella 43 - Energia specifica e densità energetica a diverse temperature

Come la capacità anche l'energia aumenta al diminuire della corrente di scarica e all'aumentare della temperatura: si noti che anche l'energia a 40°C diminuisce problema dovuto all'invecchiamento della cella come prima specificato.

Potenza.

L'accelerazione e la capacità di superare dislivelli da parte del veicolo dipendono dalla potenza erogabile dalla batteria. Rispetto ad altri parametri, le prestazioni dei veicoli elettrici rispetto a quelli convenzionali non sono in genere penalizzate.

Si parla di potenza media e potenza di picco:

- La potenza media continua che è la media delle potenze che la cella è in grado di erogare alle varie correnti di scarica;
- La potenza di picco che è quella che la cella è in grado di erogare per un tempo prestabilito dalle normative EUCAR di 30 secondi.

Entrambi i valori di potenza sono stati calcolati sia per unità di massa che di volume, definendo in tal modo la potenza specifica e la densità di potenza sia di picco che continua.

La potenza media continua è stata calcolata attraverso le varie prove effettuate per la determinazione della capacità, in quanto essa è matematicamente definita dalla relazione:

$$P = \frac{\sum_{t=1}^n V \cdot I}{n}$$

La potenza di picco invece è stata determinata con le prove effettuate con il ciclatore, poiché le correnti in gioco in questo caso sono elevate per le apparecchiature utilizzate per la misura della capacità. Essa è stata individuata per approssimazioni successive, con valori di corrente crescenti fin quando la cella è stata in grado di mantenere la corrente di scarica costante per 30 secondi senza scendere al di sotto del valore minimo di tensione (pari ai 2/3 di quella nominale). Il calcolo è stato eseguito ai vari livelli di SOC: basta infatti moltiplicare la tensione e la corrente registrati al 30° secondo. Per raggiungere i vari livelli di SOC, dopo ogni scarica a corrente elevata è stata effettuata una scarica a corrente C/2 in modo da scaricare complessivamente la cella del 20%.

Ad ogni livello di SOC inoltre si è definita la potenza di picco ai differenti secondi (multipli di 5), che ovviamente risulta essere differente per il motivo che, pur essendo la corrente costante, all'aumentare del tempo di scarica si riduce la tensione. Infine si è calcolata la potenza media di picco nei 30 secondi di scarica.

CELLA NMC

La cella NMC ha presentato un andamento di potenza specifica media continua durante la scarica alle differenti correnti C rate:

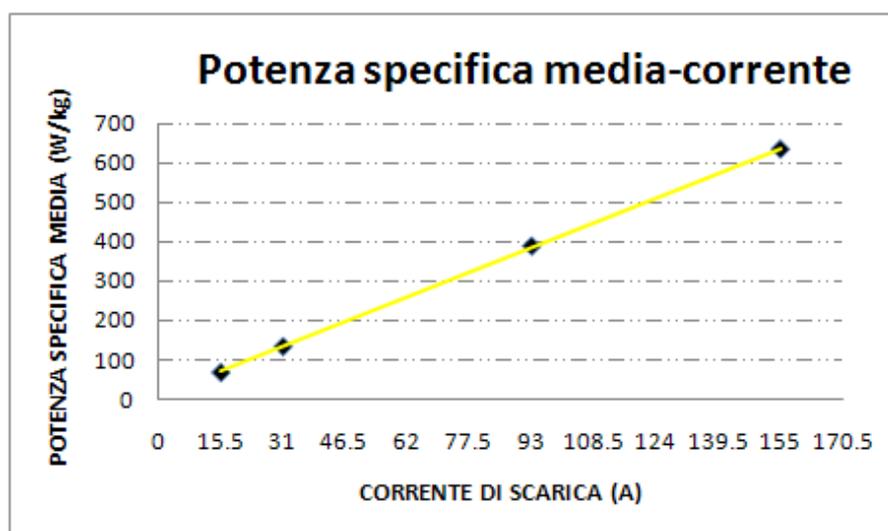


Figura 99 – Potenza specifica in funzione della corrente di scarica

Si riportano in tabella sottostante i valori numerici di potenza continua, sia in termini di massa che di volume:

Correnti di scarica (A)	Potenza media (W)	Potenza specifica media (W/kg)	Densità di potenza media (W/l)
15.5 (C/2)	57.12	67.28	143.76
31 (1 C)	113.18	133.31	284.86
93 (3 C)	330.31	389.05	831.34
155 (5 C)	539.68	635.66	1358.29

Tabella 44 - Potenza media continua alle differenti correnti di scarica

Il seguente diagramma illustra la correlazione tra energia specifica e la potenza specifica media.

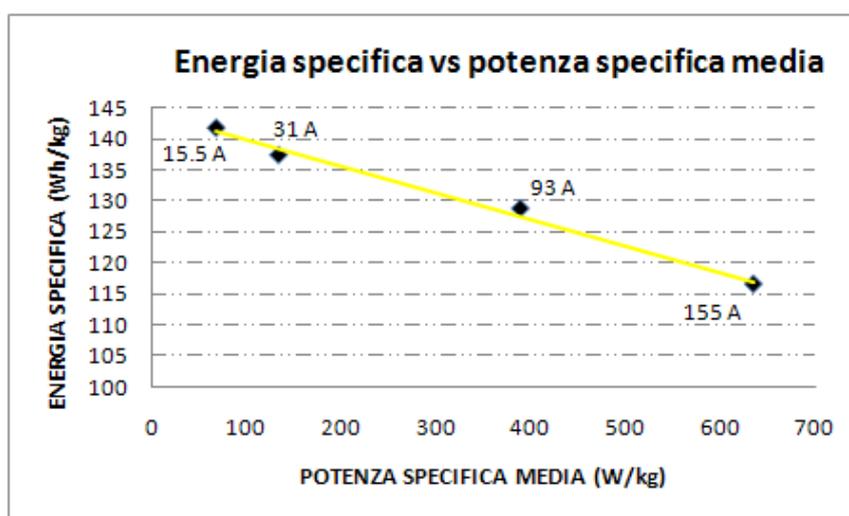


Figura 100 – Energia specifica in funzione della potenza specifica media

Si riporta di seguito, invece, l'andamento della potenza specifica media continua alle differenti correnti di scarica.

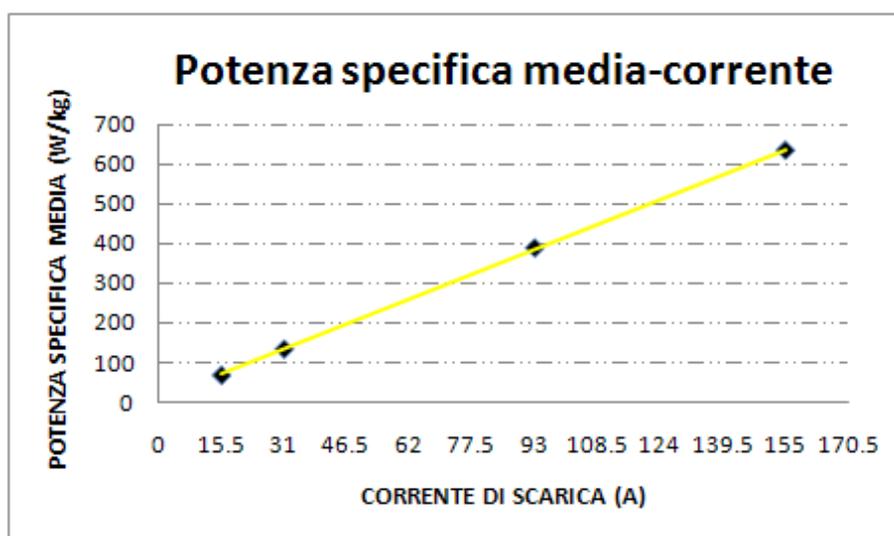


Figura 101 – Potenza specifica media in funzione della corrente di scarica

Si riportano in tabella sottostante i valori numerici di potenza continua sia in termini di massa che di volume:

Temperatura (Celsius)	Potenza media (W)	Potenza specifica media (W/kg)	Densità di potenza media (W/l)
0	109.22	128.64	274.88
23	113.18	133.31	284.86
40	121.83	143.50	306.64

Tabella 45 - Potenza media continua alle differenti temperature

Infine si riporta, come effettuato sopra, la correlazione tra energia specifica e potenza specifica media alle differenti temperature della cella:

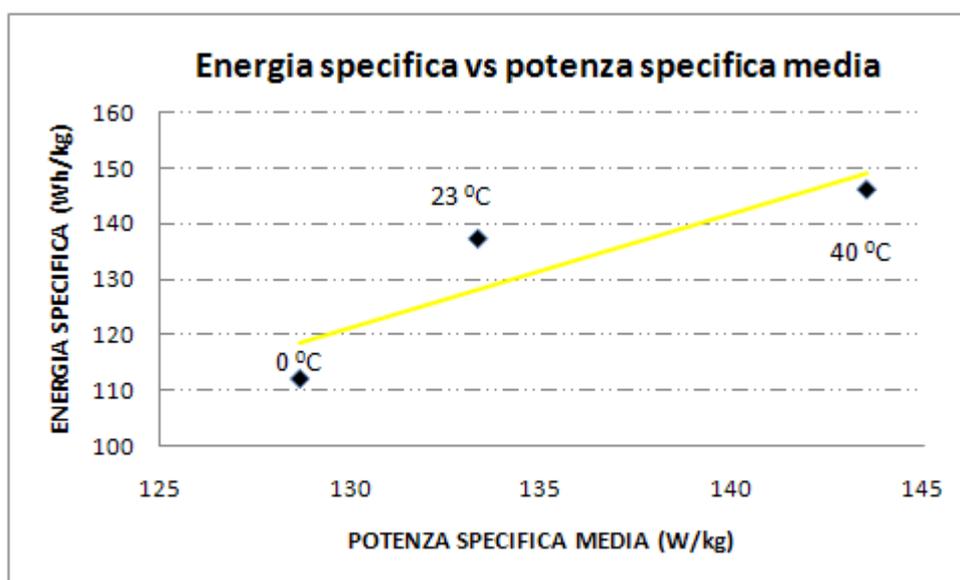


Figura 102 – Energia specifica in funzione della potenza specifica media

Per determinare la potenza di picco la prova è stata effettuata due volte, per calcolare la corrente di picco ai differenti SOC. Impostando come tensione minima ammissibile il valore 2.5 V (2/3 di quella nominale 3.7 V), tenendo conto che la cella è dichiarata 10C (310 A), sono provati ai vari SOC i valori di corrente riportati nella tabella che segue:

	PRIMA PROVA			SECONDA PROVA		
	Corrente (A)	Durata (s)	Tensione (V)	Corrente (A)	Durata (s)	Tensione (V)
SOC 100 %	310	30	3.5	310	30	3.5
SOC 80 %	310	30	3.3	310	30	3.3
SOC 60 %	310	30	3.1	310	30	3.1
SOC 40 %	310	30	2.9	310	30	2.9
SOC 20 %	310	14.5	2.5	250	23.7	2.5

Tabella 46 - Correnti di picco testate ai diversi SOC

Non è stata effettuata un'ulteriore prova a SOC 20% per trovare la corrente che la cella è in grado di mantenere per tutti i 30 secondi, per non provocare danni alla cella.

Quindi il dato dichiarato dal costruttore (cella 10 C di picco) è stato verificato in tutti i livelli del SOC tranne per quello del 20 %.

Tramite la tabella relativa alla seconda prova è possibile quindi calcolare i valori della potenza di picco ai 30 secondi come prodotto della tensione registrata per la corrente di scarica: si riportano tali valori, anche in termini di massa e di volume, nella tabella sottostante.

	Potenza (W)	Potenza specifica (W/kg)	Densità di potenza (W/l)
SOC 100 %	1085	1278	2731
SOC 80 %	1023	1205	2575
SOC 60 %	961	1132	2419
SOC 40 %	899	1059	2263

Tabella 47 - Potenza di picco(30 secondi) testate ai diversi SOC

Dalla tabella sopra si nota che la cella NMC garantisce una potenza di picco costante ed elevata (1 kW) a tutti i livelli di SOC dal 40 al 100 %.

Nelle tabelle sotto si riportano i valori di potenza di picco (PP) ai secondi multipli di 5 e la potenza media, definiti ai differenti SOC e calcolati in maniera analoga a prima:

SOC 100%	Potenza (W)	Potenza specifica (W/kg)	Densità di potenza (W/l)
PP 5 s	1165	1372	2932
PP 10 s	1147	1351	2888
PP 15 s	1137	1339	2861
PP 20 s	1127	1328	2838
PP 25 s	1117	1316	2811
PP media	1130	1331	2843

Tabella 48 - Potenza di picco variabile nel tempo al 100% SOC

SOC 80%	Potenza (W)	Potenza specifica (W/kg)	Densità di potenza (W/l)
PP 5 s	1103	1299	2776
PP 10 s	1085	1278	2730
PP 15 s	1075	1266	2706
PP 20 s	1065	1255	2682
PP 25 s	1055	1243	2655
PP media	1068	1258	2687

Tabella 49 - Potenza di picco variabile nel tempo al 80% SOC

SOC 60%	Potenza (W)	Potenza specifica (W/kg)	Densità di potenza (W/l)
PP 5 s	1050	1236	2642
PP 10 s	1034	1218	2602
PP 15 s	1020	1201	2567
PP 20 s	1007	1186	2535
PP 25 s	995	1172	2505
PP media	1011	1191	2545

Tabella 50 - Potenza di picco variabile nel tempo al 60% SOC

SOC 40%	Potenza (W)	Potenza specifica (W/kg)	Densità di potenza (kW/l)
PP 5 s	1010	1190	2543
PP 10 s	990	1166	2492
PP 15 s	972	1145	2448
PP 20 s	954	1124	2402
PP 25 s	936	1103	2356
PP media	960	1131	2417

Tabella 51 - Potenza di picco variabile nel tempo al 40% SOC

SOC 20%	Potenza (W)	Potenza specifica (W/kg)	Densità di potenza (W/l)
PP 5 s	784	923	1973
PP 10 s	755	889	1899
PP 15 s	699	824	1760
PP 20 s	682	804	1717
PP media	730	860	1837

Tabella 52 - Potenza di picco variabile nel tempo al 20% SOC

Dalle tabelle sopra riportate si ribadisce la capacità della cella di erogare nel range del SOC da 40% a 80 % una potenza costante di 1 kW per la durata di 30 secondi.

LFP

La cella LFP ha presentato un andamento di potenza specifica media continua durante la scarica alle differenti correnti C rate:

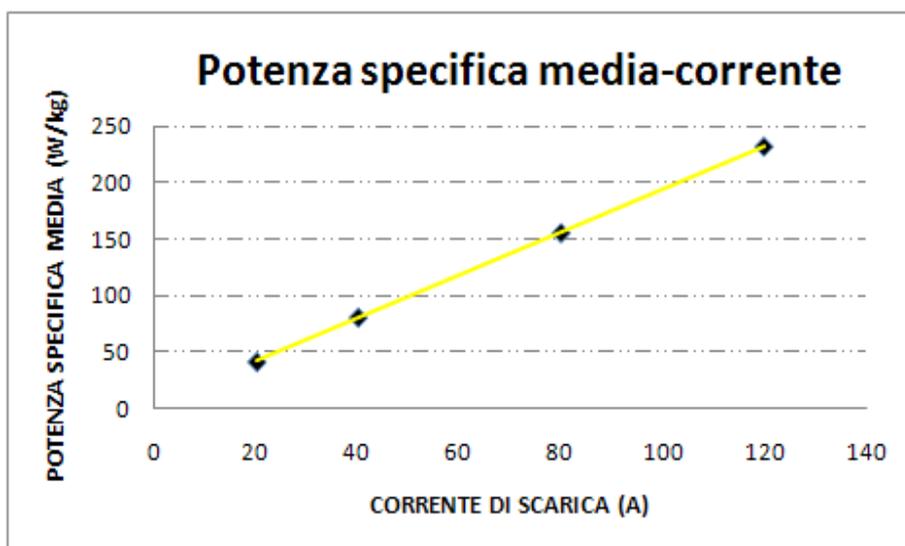


Figura 103 – Potenza specifica media in funzione della corrente di scarica

Si riportano in tabella sottostante i valori numerici di potenza continua sia in termini di massa che di volume:

Correnti di scarica (A)	Potenza media (W)	Potenza specifica media (W/kg)	Densità di potenza media (W/l)
20 (C/2)	63.73	40.93	68.42
40 (1 C)	125.33	80.50	134.55
80 (2 C)	242.14	155.52	259.94
120 (3 C)	361.80	232.37	388.40

Tabella 53 - Potenza media continua alle differenti correnti di scarica

La correlazione tra potenza specifica ed energia specifica, come per le Cella NMC, è riportata nel diagramma seguente:

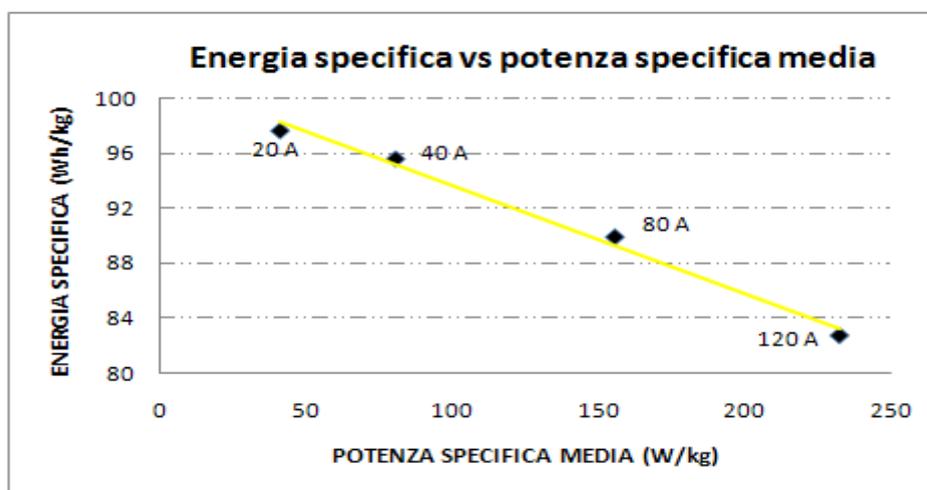


Figura 104 – Energia specifica in funzione della potenza specifica media

Si riporta di seguito, invece, l'andamento della potenza specifica media continua durante la scarica di 40 A (1 C) alle differenti temperature:

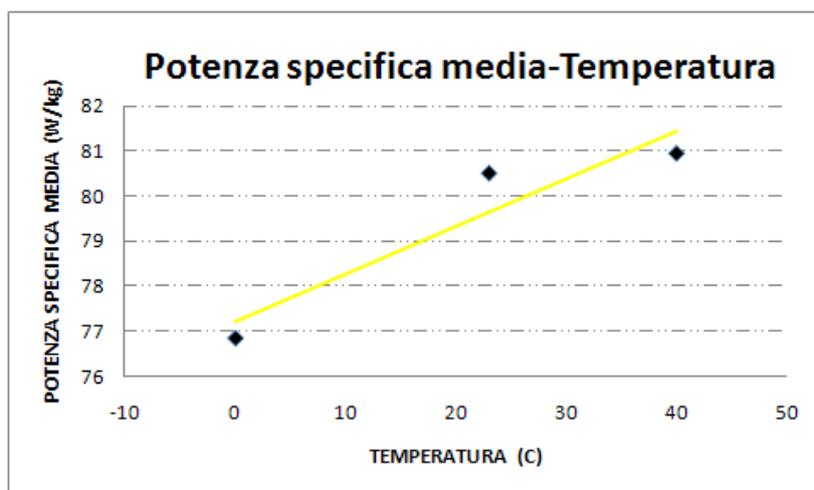


Figura 105 – Potenza specifica in funzione della temperatura

Si riportano in tabella sottostante i valori numerici di potenza continua sia in termini di massa che di volume:

Temperatura (Celsius)	Potenza media (W)	Potenza specifica media (W/kg)	Densità di potenza media (W/l)
0	119.66	76.85	128.46
23	125.33	80.50	134.55
40	126.02	80.94	135.28

Tabella 54 - Potenza media continua alle differenti temperature

Infine si riporta, come effettuato sopra, la correlazione tra energia specifica e potenza specifica media alle differenti temperature della cella:

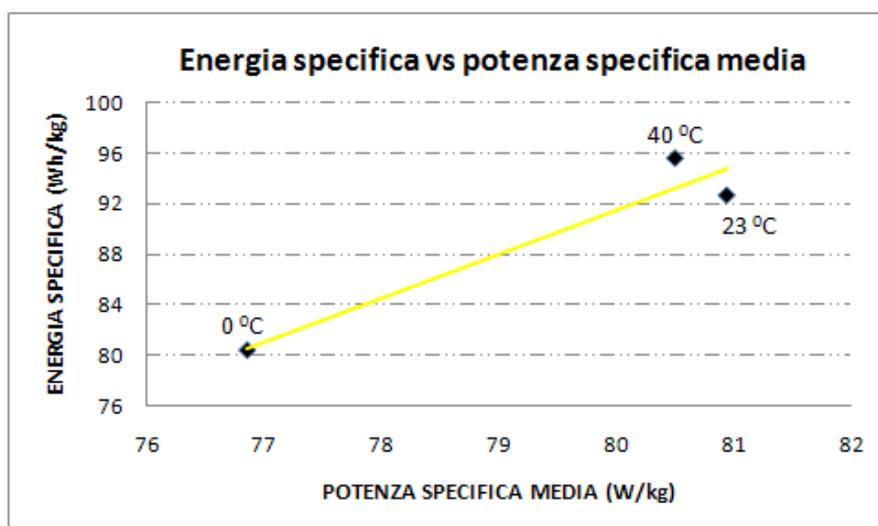


Figura 106 – Energia specifica in funzione della potenza specifica media

Le prove effettuate per definire la massima corrente di picco ai differenti SOC sono state 3. Ogni singola prova, come definito dalle procedure EUCAR, è stata preceduta da un ciclo standard costituito da una scarica a C/2 (20 A), la stabilizzazione di un ora della tensione ed una successiva carica a C/2 fino alla tensione massima di 4.25 V.

Impostando come tensione minima ammissibile il valore 2.2 V (2/3 di quella nominale 3.2 V), tenendo conto che la cella è dichiarata 10C (400 A), nelle due prove si sono provati ai vari SOC i seguenti valori di corrente ottenendo:

	PRIMA PROVA			SECONDA PROVA			SECONDA PROVA		
	Corrente (A)	Durata (s)	Tensione (V)	Corrente (A)	Durata (s)	Tensione (V)	Corrente (A)	Durata (s)	Tensione (V)
SOC 100 %	400	30	2.3	400	30	2.3	400	30	2.3
SOC 80 %	400	20	2.2	300	30	2.4	300	30	2.4
SOC 60 %	400	16.4	2.2	300	25.4	2.2	250	30	2.5
SOC 40 %	400	14.9	2.2	300	22	2.2	250	30	2.2
SOC 20 %	400	13.5	2.2	200	30	2.5	200	23.7	2.4

Tabella 55 - Correnti di picco testate ai diversi SOC

La cella si è dimostrata in grado di mantenere la corrente di picco dichiarata 10C per 30s solo quando completamente carica (SOC = 100%), mentre per valori dello stato di carica tra il 40% e l'80% garantisce una corrente di picco di 250 A, valore che diminuisce a 200 con un SOC pari al 20 %.

Tramite la tabella della pagina precedente (terza prova) è facile quindi calcolare la potenza di picco ai 30 secondi come semplice prodotto della tensione registrata per la corrente di scarica: si riportano in tabella sottostante tali valori anche in termini di massa e di volume.

	Potenza (W)	Potenza specifica (W/kg)	Densità di potenza (W/l)
SOC 100 %	920	591	988
SOC 80 %	720	462	773
SOC 60 %	625	401	671
SOC 40 %	550	353	590
SOC 20 %	480	308	515

Tabella 56 - Potenza di picco(30 secondi) testate ai diversi SOC

Dalla tabella sopra si nota che la cella LFP non garantisce affatto una potenza di picco costante e allo stesso tempo elevata (0.5 - 0.72 kW) ai livelli del SOC dal 40 al 80 %. Tale valore, inoltre, risulta essere ancor minore andando a considerarla in termini di massa e di volume.

Nelle tabelle sotto si riportano i valori di potenza di picco (PP) ai differenti secondi (multipli di 5) e quella media, definiti ai differenti SOC e calcolati in maniera analoga a come effettuato prima:

SOC 100%	Potenza (W)	Potenza specifica (W/kg)	Densità di potenza (W/l)
PP 5 s	1155	742	1240
PP 10 s	1135	729	1219
PP 15 s	1113	715	1195
PP 20 s	1087	698	1167
PP 25 s	1040	668	1116
PP media	1075	690	1154

Tabella 57 - Potenza di picco variabile nel tempo al 100% SOC

SOC 80%	Potenza (W)	Potenza specifica (W/kg)	Densità di potenza (W/l)
PP 5 s	887	570	953
PP 10 s	872	560	937
PP 15 s	856	550	919
PP 20 s	839	539	901
PP 25 s	802	515	861
PP media	829	533	890

Tabella 58 - Potenza di picco variabile nel tempo al 80% SOC

SOC 60%	Potenza (W)	Potenza specifica (W/kg)	Densità di potenza (W/l)
PP 5 s	741	476	796
PP 10 s	731	469	784
PP 15 s	719	462	772
PP 20 s	705	453	757
PP 25 s	682	438	732
PP media	700	450	752

Tabella 59 - Potenza di picco variabile nel tempo al 60% SOC

SOC 40%	Potenza (W)	Potenza specifica (W/kg)	Densità di potenza (W/l)
PP 5 s	727	467	780
PP 10 s	711	457	764
PP 15 s	693	445	744
PP 20 s	675	433	724
PP 25 s	630	404	676
PP media	664	427	713

Tabella 60 - Potenza di picco variabile nel tempo al 40% SOC

SOC 20%	Potenza (W)	Potenza specifica (W/kg)	Densità di potenza (W/l)
PP 5 s	584	375	627
PP 10 s	571	367	613
PP 15 s	561	360	602
PP 20 s	547	351	587
PP 25 s	527	339	566
PP media	545	350	585

Tabella 61 - Potenza di picco variabile nel tempo al 20% SOC

Questa tipologia di cella è in grado di mantenere una potenza di picco di soli 0.7 kW dal 40 al 80 % del SOC, valore che diminuisce ulteriormente se si considera il valore specifico in kg (il peso della cella è infatti di 1.557 kg).

Determinazione delle resistenze interne

La resistenza interna è un parametro importante per la conoscenza dei fenomeni di riscaldamento e di perdita di efficienza della batteria: una sua conoscenza completa implicherebbe la sua misura a tutti gli stati di carica (SOC), a varie temperature, a varie correnti in carica e scarica e permetterebbe la conoscenza dell'andamento delle risposte dinamiche del dispositivo.

Il circuito equivalente di una cella di una batteria si può schematizzare come mostrato nella figura seguente:

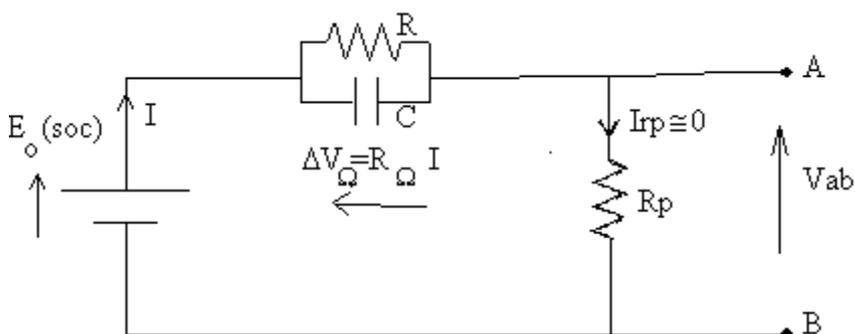


Figura 107 – circuito equivalente della singola cella

Si tratta di un modello dinamico che prevede la presenza di un generatore di f.e.m. E_0 , una resistenza e una capacità in parallelo ed infine una resistenza serie $R\Omega$. Una tale semplificazione è in realtà solo apparente, poiché contiene elementi aventi tutti una caratteristica non lineare, tuttavia in prima approssimazione è possibile pensare le resistenze aventi valori fissi.

La resistenza in parallelo R_p viene generalmente trascurata: essa rappresenta le perdite dovute all'auto-scarica del sistema e tutte le perdite che avvengono quando la batteria è eccessivamente carica.

La resistenza serie $R\Omega$ è definita da due contributi:

- la resistenza che la corrente incontra con il passaggio attraverso i conduttori elettrici interni alla cella;

- la resistenza provocata da fenomeni elettrochimici.
- Tale parametro non è affatto costante ne' con la frequenza, né con la corrente di carica e di scarica, ne' con variazioni di tali livelli di corrente e nemmeno con la temperatura.
- La prova effettuata ha analizzato la misura della R_{Ω} secondo il tradizionale metodo dell'interruzione di corrente di carica/scarica definito dalle procedure EUCAR: si impongono alla cella, ad un determinato SOC, le operazioni indicate nella figura della pagina seguente.

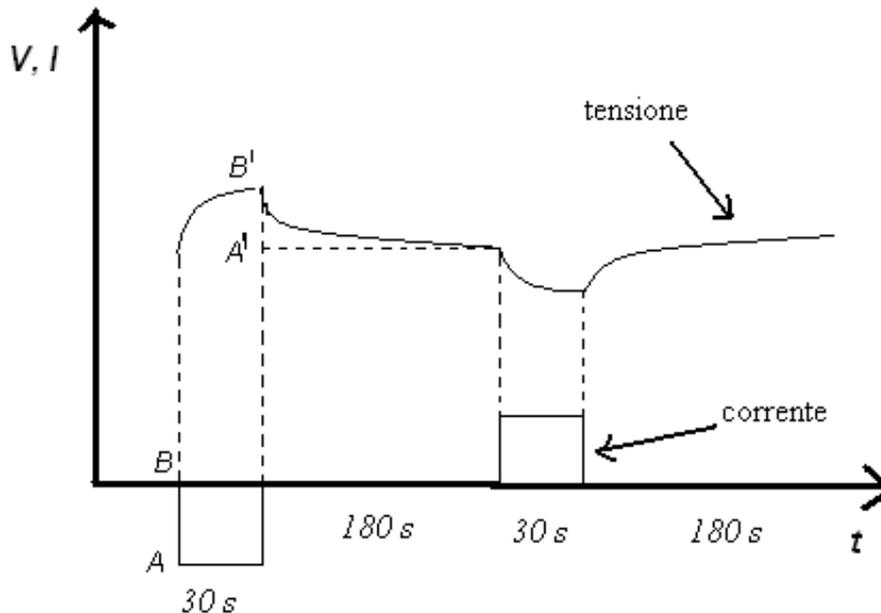


Figura 108 – profilo di prova resistenza interna

- un impulso di corrente costante sotto forma di un gradino in ingresso della durata di 30 secondi;
- una fase di riposo di 180 secondi;
- un impulso di corrente in uscita dalla cella della durata di 30 secondi;
- una fase finale di riposo di 180 secondi.

Ad un determinato SOC, il metodo consiste nella misura della variazione di tensione, in un tempo di 20 ms, conseguente alla interruzione dell'impulso di corrente di carica/scarica.

La misura viene effettuata secondo la seguente semplice formula:

$$R_{\Omega} = \frac{V_{in} - V_{fin}}{I}$$

dove: V_{in} è la tensione iniziale, V_{fin} è la tensione finale ed I è la corrente impulsiva applicata. Questa resistenza $R_{\Omega imp}$, definita in carica e scarica, è quindi quella che definisce la caduta di tensione della cella con un impulso di corrente.

Un'altra resistenza interna di carica/scarica che viene valutata durante questa prova è quella definita "Overall Resistance" $R_{\Omega over}$ (resistenza globale), definita come rapporto tra la caduta di tensione che si registra tra la fine dell'impulso e dopo 180 secondi da esso, e la corrente I .

Tutte le misure di resistenza sono state fatte alle varie temperature.

CELLA NMC

Per la prova di resistenza interna si è effettuato lo studio considerando la sola corrente di carica-scarica 1 C (31 A), alle differenti temperature (0°C, 23°C e 40°C), così come previsto dalle procedure EUCAR ottenendo i seguenti valori:

SOC %	$R_{\Omega imp}$ Carica	$R_{\Omega imp}$ Scarica	$R_{\Omega over}$ Carica	$R_{\Omega over}$ Scarica
	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]
100%	1.242	4.271	1.506	5.306
80%	4.213	4.203	5.197	5.542
60%	4.281	4.361	5.226	5.600
40%	4.558	4.655	5.503	6.103
20%	5.000	5.494	6.210	7.274

Tabella 62 - Valori resistenza interna limp e lover ai differenti SOC a 0°C

SOC %	$R_{\Omega imp}$ Carica	$R_{\Omega imp}$ Scarica	$R_{\Omega over}$ Carica	$R_{\Omega over}$ Scarica
	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]
100%	0.668	1.435	1.023	2.035
80%	1.171	1.200	1.694	2.106
60%	1.152	1.161	1.652	1.771
40%	1.181	1.194	1.723	1.932
20%	1.319	1.348	2.010	2.145

Tabella 63 - Valori resistenza interna limp e lover ai differenti SOC a 23°C

SOC %	$R_{\Omega imp}$ Carica	$R_{\Omega imp}$ Scarica	$R_{\Omega over}$ Carica	$R_{\Omega over}$ Scarica
	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]
100%	0.210	0.739	0.326	1.123
80%	0.739	0.777	1.123	1.368
60%	0.748	0.768	1.142	1.232
40%	0.797	0.787	1.200	1.329
20%	0.855	0.868	1.339	1.410

Tabella 64 - Valori resistenza interna limp e lover ai differenti SOC a 40°C

Si riportano di seguito le rappresentazioni grafiche alle differenti temperature dei valori che la resistenza interna globale di carica/scarica assume ai differenti SOC:

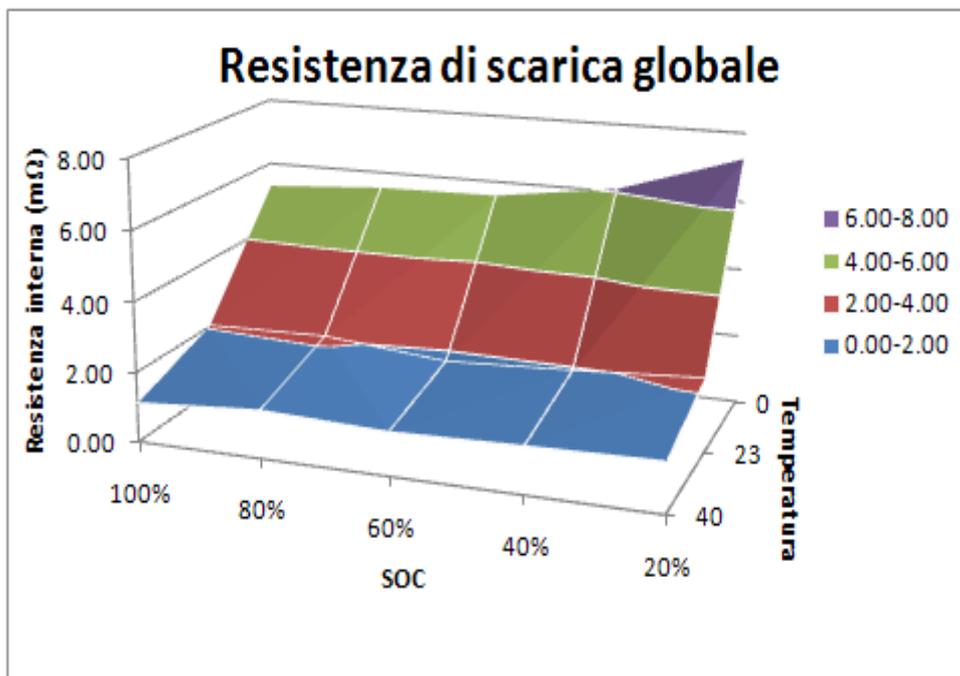
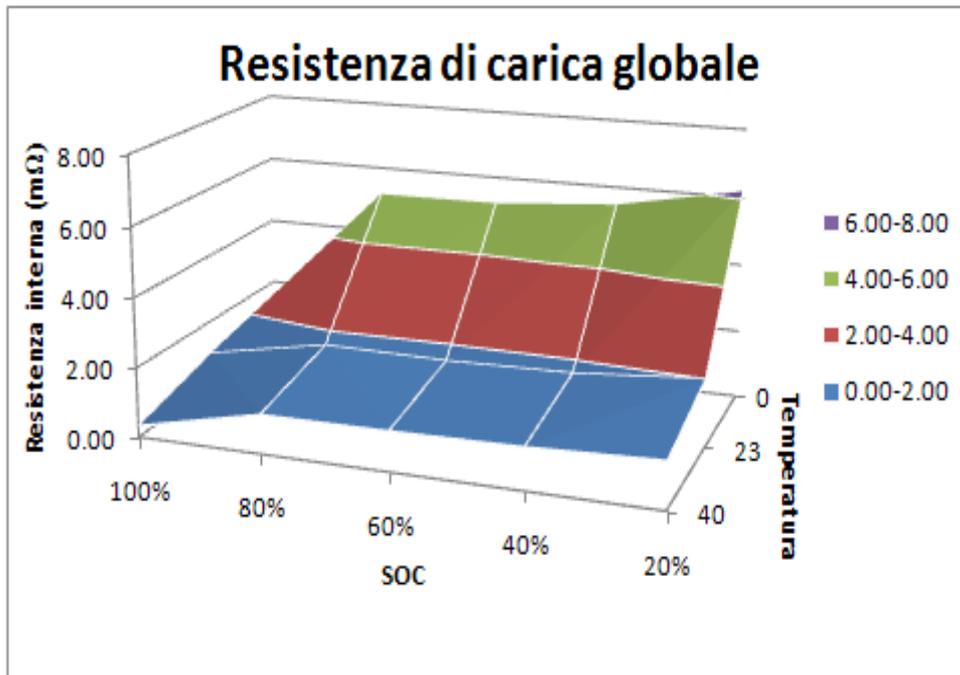


Figura 109 – Resistenza interna globale di carica e scarica cella NMC

È evidente che il valore della resistenza interna aumenta al diminuire della temperatura, determinando una maggiore caduta di tensione a temperature più basse.

In carica la resistenza si mantiene pressoché costante tra il 40 e 80 % del SOC mentre diminuisce al SOC 100 % e aumenta al 20 % del SOC: tali variazioni sono in percentuali più accentuate al diminuire della temperatura.

La resistenza di scarica assume gli stessi andamenti della resistenza di carica ma con valori in assoluto di poco aumentati e variazioni molto più ristrette.

LFP

Anche in questo caso si è effettuato lo studio considerando la sola corrente di carica-scarica 1C (40A), alle differenti temperature (0°C, 23°C e 40°C), così come previsto dalle procedure EUCAR ottenendo i seguenti valori:

SOC %	$R_{\Omega imp}$ Carica	$R_{\Omega imp}$ Scarica	$R_{\Omega over}$ Carica	$R_{\Omega over}$ Scarica
	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]
100%	4.425	4.273	19.255	5.608
80%	4.630	4.618	5.973	5.967
60%	4.775	4.868	6.173	6.418
40%	4.753	5.072	6.165	7.087
20%	4.708	5.370	6.165	9.170

Tabella 65 - Valori resistenza interna limp e lover ai differenti SOC a 0°C

SOC %	$R_{\Omega imp}$ Carica	$R_{\Omega imp}$ Scarica	$R_{\Omega over}$ Carica	$R_{\Omega over}$ Scarica
	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]
100%	1.288	2.198	11.825	3.343
80%	2.268	2.235	3.030	3.065
60%	2.343	2.328	3.188	3.188
40%	2.317	2.388	3.195	3.395
20%	2.280	2.503	3.220	3.737

Tabella 66 - Valori resistenza interna limp e lover ai differenti SOC a 23°C

SOC %	$R_{\Omega imp}$ Carica	$R_{\Omega imp}$ Scarica	$R_{\Omega over}$ Carica	$R_{\Omega over}$ Scarica
	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]
100%	0.770	1.845	7.218	2.740
80%	1.985	1.975	2.655	2.648
60%	2.053	2.060	2.688	2.768
40%	2.050	2.143	2.722	2.938
20%	2.068	2.213	2.768	3.150

Tabella 67 - Valori resistenza interna limp e lover ai differenti SOC a 40 °C

Si riportano di seguito le rappresentazioni grafiche alle differenti temperature dei valori che la resistenza interna globale di carica/scarica assume ai differenti SOC:

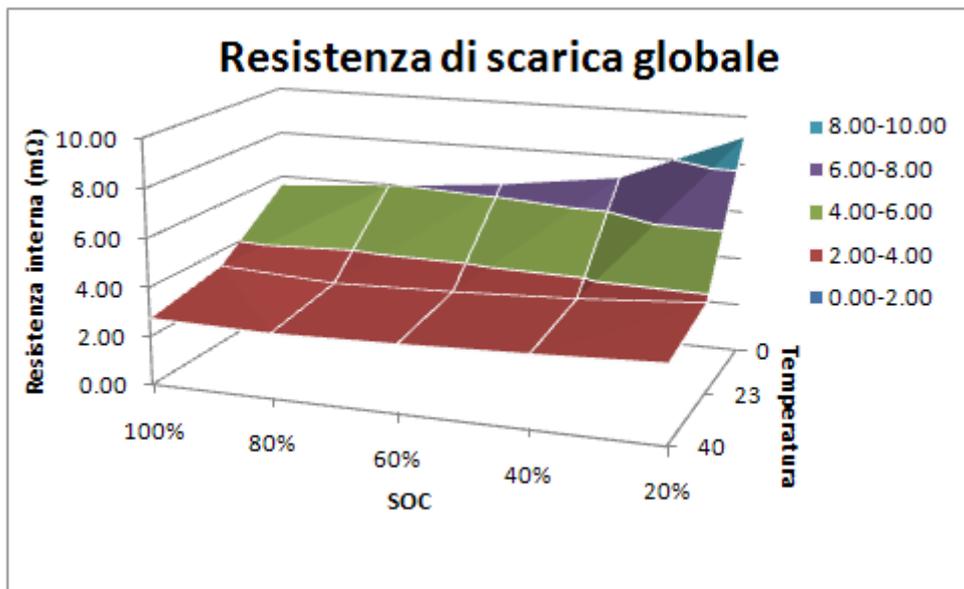
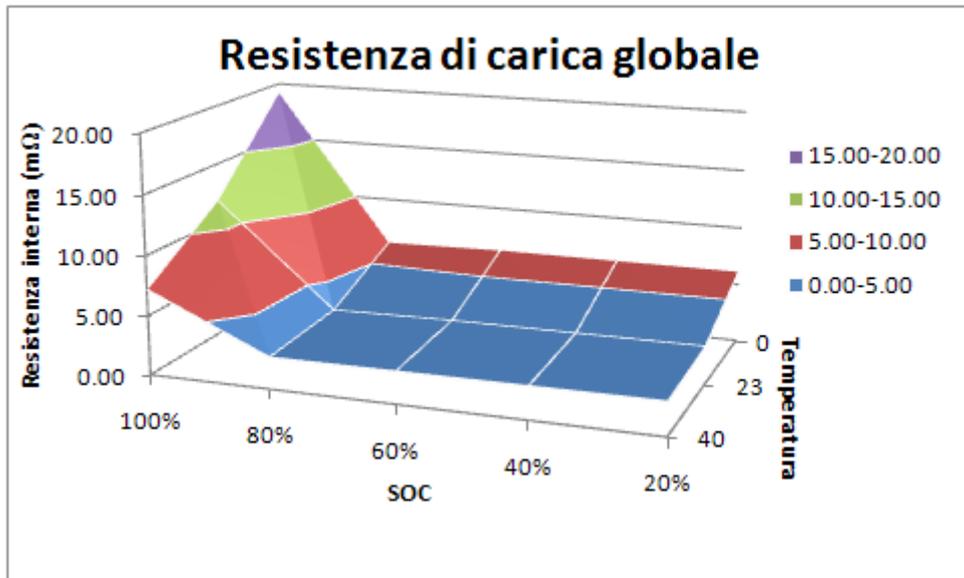


Figura 110 – Resistenza interna globale di carica e scarica cella LFP

In carica la resistenza globale si mantiene pressoché costante tra il 20 e 80 % del SOC mentre aumenta di quattro volte circa al SOC 100 % assumendo valori anche dell'ordine dei decimi di mΩ. Tale comportamento si ha in quanto il salto della tensione ottenuto staccando il generatore è rilevante (ordine di 0.5 V).

La resistenza di scarica assume valori costanti a 23°C e 40°C, mentre assume a 0°C valori variabili da 5.5 e 9 mΩ con picchi al 20% del SOC.

Determinazione della tensione (OCV)

L'indagine sull'andamento della tensione in funzione dello stato di carica (SOC) si esegue portando la cella, durante la scarica, ad un determinato livello di SOC e facendo stabilizzare la tensione ad un valore costante (per circa 2-3 ore) così come previsto dalla prova "Open circuit voltage (OCV)" definita all'interno delle procedure EUCAR. Tale valore è importante per definire

in prima approssimazione il SOC della cella: infatti mentre per la scarica esso è facilmente determinabile calcolando la capacità residua, durante una ricarica l'individuazione risulta essere complessa e ci si avvale del valore tensione (OCV).

È ovvio che maggiore è il valore di questo parametro, migliori sono le caratteristiche in termini di energia e potenza della cella ai vari livelli del SOC. La valutazione è stata effettuata alle varie temperature.

CELLA NMC

Si riportano di seguito i valori delle tensioni ai vari SOC registrati alle varie temperature:

Tensione (Volt)	TEMPERATURA		
	0 °C	23 °C	40 °C
SOC 100 %	4.161	4.19	4.192
SOC 80 %	3.946	3.977	3.956
SOC 60 %	3.772	3.771	3.756
SOC 40 %	3.666	3.665	3.658
SOC 20 %	3.592	3.571	3.553

Tabella 68 - Correlazione tensione, SOC e temperatura per la cella NMC

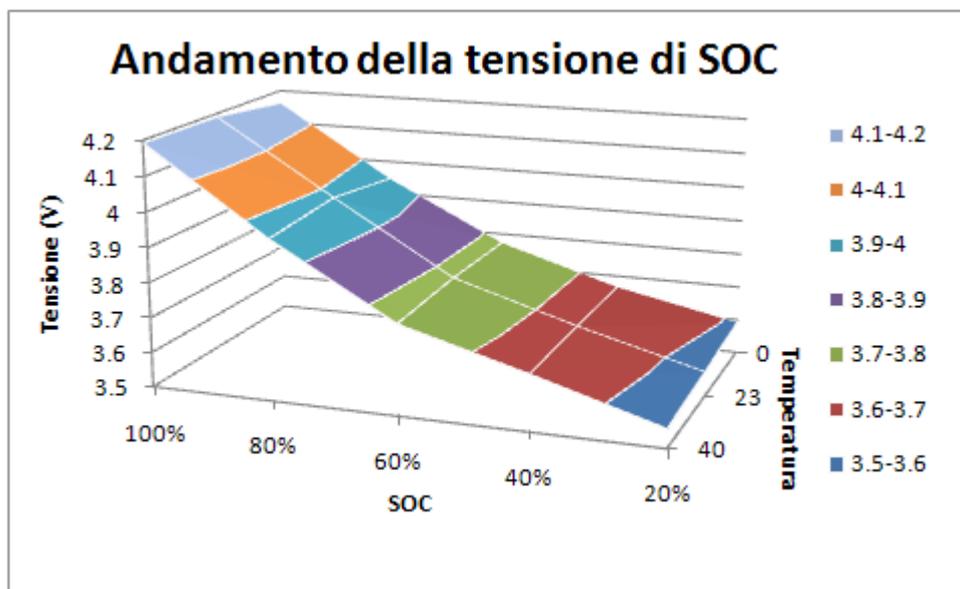


Figura 111 – Correlazione tensione, SOC e temperatura per la cella NMC

Si nota un andamento della tensione pressoché costante ai differenti SOC alle varie temperature, con un leggero miglioramento alla temperatura ambiente. La cella mantiene quindi l'andamento della tensione simile indifferentemente dalla temperatura di prova.

LFP

Si riportano di seguito i valori delle tensioni ai vari SOC registrati alle varie temperature:

Tensione (Volt)	TEMPERATURA		
	0 °C	23 °C	40 °C
SOC 100 %	3.455	3.756	3.936
SOC 80 %	3.332	3.303	3.335
SOC 60 %	3.295	3.33	3.302
SOC 40 %	3.272	3.291	3.291
SOC 20 %	3.237	3.24	3.234

Tabella 69 - Correlazione tensione, SOC e temperatura per la cella LFP

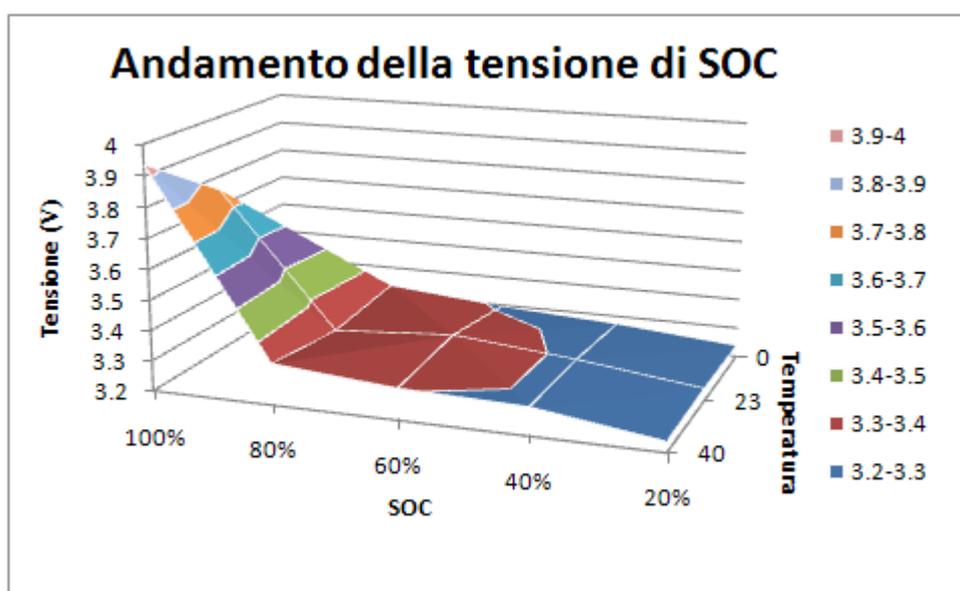


Figura 112 – Correlazione tensione, SOC e temperatura per la cella LFP

L'andamento della tensione per la cella LFP varia in funzione del SOC e della temperatura considerata. Al 100 % del SOC il calo della tensione risulta essere rilevante passando da una tensione 3.93 V a 40 °C a 3.45 V a 0 °C, dal SOC 80 % al SOC 20 % la tensione è stabile alle varie temperature tranne che per il SOC 60 % a 0 °C.

Autoscarica

L'autoscarica è quel fenomeno per il quale la cella tende a perdere la propria carica elettrica nel tempo anche quando non connesso ad alcun carico: tutte le celle sono purtroppo affette da valori di autoscarica più o meno forti rispetto al valore della tensione nominale.

Questa misura è molto interessante per determinare quantitativamente il valore delle perdite per autoscarica, incide fortemente sul rendimento energetico e di carica e se ne deve tenere conto specialmente in quelle applicazioni che richiedono un accumulo prolungato nel tempo.

I principali fattori che determinano l'autoscarica sono dovuti al tipo di tecnologia adottata e alla temperatura ambiente.

La modalità di misura si può riassumere praticamente nella acquisizione dei valori di tensione che la cella presenta con il passare del tempo, quando è sconnessa da qualsiasi carico; l'unica avvertenza sta nel fatto che i campioni più significativi si hanno nella prima ora di misurazioni, visto che in tale arco di tempo c'è il maggior decremento di tensione.

CELLA NMC

Le acquisizioni sono state effettuate scollegando la cella da qualsiasi conduttore per evitare che eventuali sistemi di misura potessero alterare il risultato delle misurazioni. La cella è stata lasciata completamente carica a temperatura ambiente (23°C) per 62 ore, rilevando il seguente andamento di tensione:

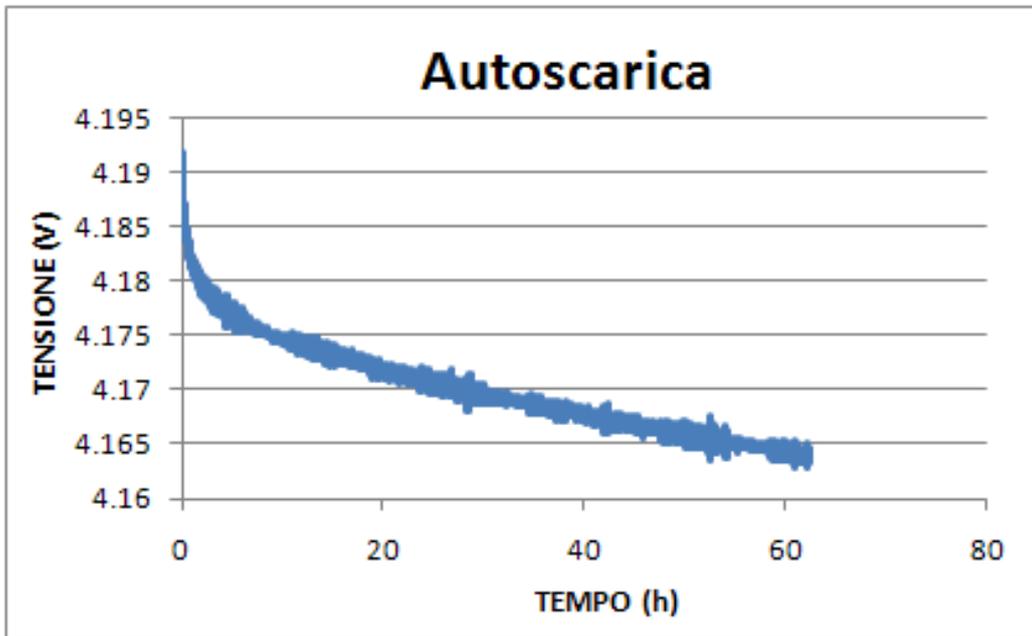


Figura 113 – Tensione di auto scarica per la cella NMC

Da un valore medio di 4.19 Volt, registrato nella prima ora, il valore della tensione diminuisce a 4.17 V dopo 24 ore, a 4.166 V dopo 48 ore e a 4.163 V dopo 62 ore: l'autoscarica rilevata nelle 62 ore è del 0.644 %.

Si nota l'andamento decrescente della variazione della tensione che risulta essere nelle prime 24 ore pari a 0.477 %, nelle successive 24 ore pari a 0.096 %.

Si riportano nella tabella sotto i valori di capacità ed energia e i relativi rendimenti ottenuti dopo 62 ore confrontati rispetto a quelli ottenuti nelle prove di capacità:

	CAPACITA' DI SCARICA (Ah)	ENERGIA DI SCARICA (Wh)	RENDIMENTO DI CARICA (%)	RENDIMENTO ENERGETICO (%)
Dopo 1 ora	32.69	120.36	99.42	95.06
Dopo 62 ore	32.04	117.57	98.48	94.91

Tabella 70 - Parametri in scarica registrati dopo differenti ore dalla carica per la cella NMC

Dopo 62 si nota l'evidente riduzione sia della capacità e dell'energia in termini assoluti, i valori dei rendimenti si sono ridotti di circa 1 % per quello di carica e di circa 0.2 % per quello energetico.

LFP

Anche per questa cella, come per la NMC, si è registrato l'andamento della tensione qui di seguito riportato:

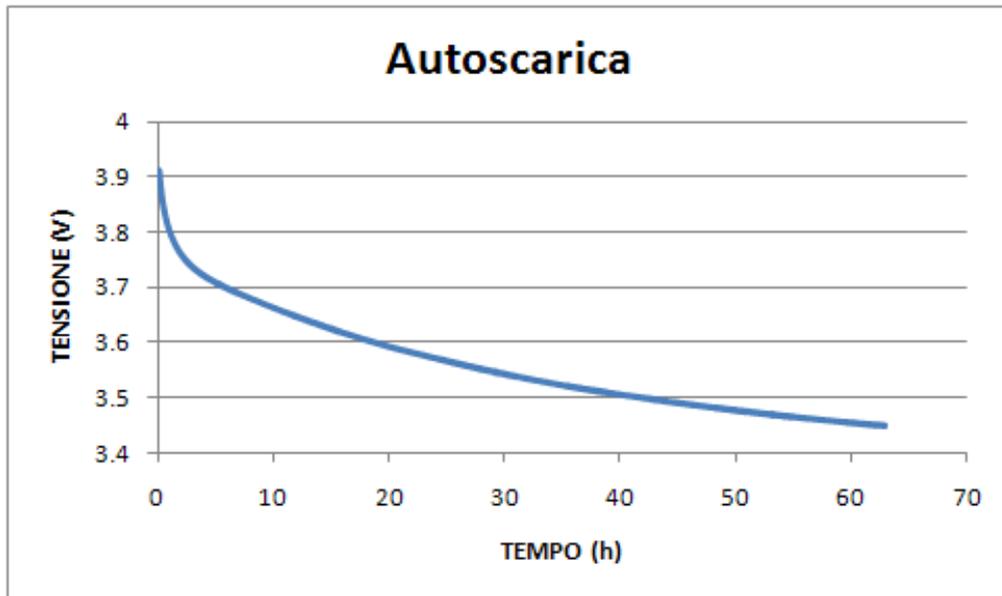


Figura 114 – Tensione di auto scarica per la cella LFP

Da un valore di 3.9 V, registrato nella prima ora, il valore della tensione diminuisce a 3.570 V dopo 24 ore, a 3.481 V dopo 48 ore e a 3.448 V dopo 62 ore: l'autoscarica rilevata nelle 62 ore è del 11.59 %.

Si nota l'andamento decrescente della variazione della tensione che risulta essere nelle prime 24 ore pari a 10.74 %, nelle successive 24 ore pari a 0.95 %.

Si riportano nella tabella sotto i valori di capacità ed energia e i relativi rendimenti ottenuti dopo 62 ore confrontati rispetto a quelli ottenuti nelle prove di capacità:

	CAPACITA' DI SCARICA (Ah)	ENERGIA DI SCARICA (Wh)	RENDIMENTO DI CARICA (%)	RENDIMENTO ENERGETICO (%)
Dopo 1 ora	47.87	152.1	98.50	90.92
Dopo 62 ore	46.26	147.73	95.19	88.30

Tabella 71 - Parametri in scarica registrati dopo differenti ore dalla carica per la cella LFP

Dopo 62 si nota l'evidente riduzione sia della capacità e dell'energia in termini assoluti, i valori dei rendimenti si sono ridotti di circa il 4 % quello di carica e di circa il 3 % quello energetico.

Confronto

Si riportano di seguito le tabelle di confronto dei parametri della cella NMC e LFP così come calcolati/misurati nei paragrafi precedenti:

	PRESTAZIONI DI CELLA					
	NMC			LFP		
	C/2	1C	3C	C/2	1C	3C
Capacità (Ah)	32.69	31.93	30.748	47.87	47.61	42.69
Energia specifica (Wh/kg)	141.77	137.39	128.72	97.68	95.73	82.72
Densità energetica (Wh/l)	302.93	293.57	275.04	163.28	159.85	138.27
Potenza specifica media (W/kg)	67.28	133.31	389.05	40.93	80.50	232.37
Densità media di potenza (W/l)	143.76	284.86	831.34	68.42	134.55	388.4
Rendimento di carica (%)	99.42	97.11	91.23	98.50	97.31	89.99
Rendimento energetico (%)	96.06	93.09	85.24	90.92	88.93	77.60

Tabella 72 - Caratteristiche di scarica a differenti C rate a confronto

Come si evince dalla tabella sopra, la cella LFP presenta prestazioni inferiori in energia e potenza media a qualsiasi C rate, sia in termini di densità che di massa. Ciò è principalmente dovuto alla differente tensione nominale (3.7 per le NMC contro 3.2 per le LFP).

In termini energetici le celle NMC presentano al medesimo C-rate un'energia specifica superiore del 30 % rispetto alle LFP, mentre la densità energetica risulta essere superiore anche del 45 %.

Confrontando la potenza media specifica si nota che le Celle NMC presentano in termini di massa una potenza superiore di circa il 40% mentre in termini di volume tale differenza supera anche il 50 %: un pacco di celle NMC con medesima energia di un pacco LFP, oltre che ad avere un peso e un volume minore, riesce ad erogare una potenza continua maggiore garantendo maggiore potenza erogabile dalla batteria e quindi maggiore accelerazione.

Tali considerazioni sono maggiormente evidenti riportando il "Diagramma di Ragone" per entrambi i dispositivi:

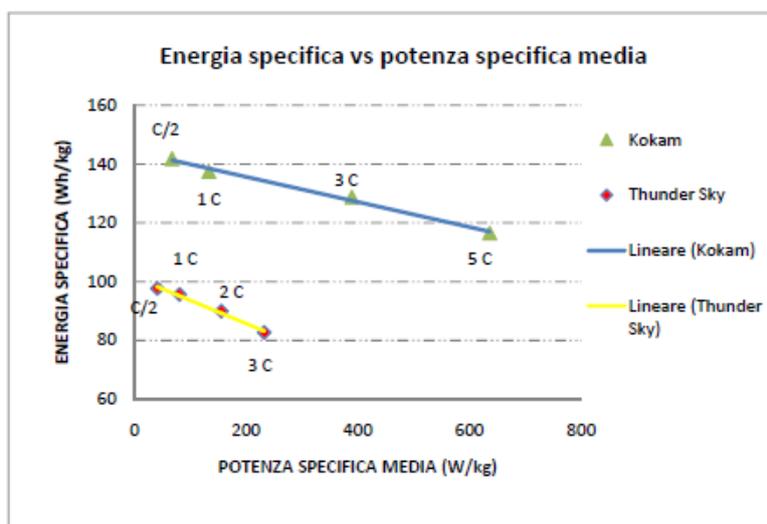


Figura 115 – Energia specifica vs potenza specifica media a confronto NMC – LFP

Altra caratteristica della cella NMC è il maggiore valore del rapporto Potenza/Energia: tale parametro è di fondamentale importanza per un ibrido dove l'orientamento è quello di avere sistemi prevalentemente di "potenza".

Il rendimento di carica risulta essere maggiore per le Celle NMC e allo stesso tempo più stabile al variare delle correnti di scarica: si hanno minori perdite di carica tra ingresso e uscita.

Anche per quel che riguarda il rendimento energetico le Celle NMC presentano caratteristiche migliori sia in termini assoluti sia in termini di variazioni alle differenti C rate di scarica: ciò indica una migliore qualità della cella NMC.

I medesimi parametri definiti sopra sono stati verificati anche a differenti temperature di funzionamento, con scarica a 1 C, ottenendo i risultati riportati in tabella. Il confronto per la cella NMC è stato effettuato tra la temperatura ambiente (23 °C) e quella a 0 °C, perché la prova a 40°C è risultata poco attendibile.

Caratteristiche delle prestazioni scarica 1 C						
	NMC			LFP		
	0 °C	RT	40 °C	0 °C	RT	40 °C
Capacità (Ah)	27.08	31.93	33.81	42.16	47.60	45.8
Energia specifica (Wh/kg)	112.02	137.39	146.28	80.33	95.73	92.67
Densità energetica (Wh/l)	239.38	293.57	312.57	134.28	159.85	154.9
Potenza specifica media (W/kg)	128.64	133.31	143.50	76.85	80.50	80.94
Densità media di potenza (W/l)	274.88	284.86	306.64	28.46	134.55	135.28
Rendimento di carica (%)	91.44	97.11	98.53	88.07	97.31	97.41
Rendimento energetico (%)	81.73	93.09	95.84	73.91	88.93	90.92

Tabella 73 - Caratteristiche di scarica 1 C a differente temperatura a confronto

In termini assoluti i parametri della cella NMC alle due temperature presentano valori superiori alla LFP, con circa le medesime percentuali prima evidenziate.

La variazione percentuale, invece, per la medesima cella a differenti temperature risulta superiore nel caso della cella NMC: infatti a 0°C la cella NMC presenta una capacità ridotta del 15.2 % (LFP 11.5 %) con un'energia ridotta del 18.5% (LFP 16 %). A tale vantaggio, però, la cella LFP unisce lo svantaggio di avere rendimenti (coulombiano ed energetico) molto più bassi in termini assoluti con variazioni in funzione della temperatura molto più accentuate. Infine la potenza risulta essere pressoché costante alle differenti temperature (per le NMC \pm 3.5 % mentre per le LFP \pm 5 %).

Per quel che riguarda la potenza di picco si riportano nella seguente tabella i valori per le due celle ai differenti SOC sia in termini di massa che di volume:

	NMC			LFP		
	Potenza	Potenza specifica	Densità di potenza	Potenza	Potenza specifica	Densità di potenza
	(W)	(W/kg)	(W/l)	(W)	(W/kg)	(W/l)
SOC 100 %	1085	1278	2731	920	591	988
SOC 80 %	1023	1205	2575	720	462	773
SOC 60 %	961	1132	2419	625	401	671
SOC 40 %	899	1059	2263	550	353	590
SOC 20 %	X	X	X	480	308	515

Tabella 74 - Potenza di picco ai differenti SOC a confronto

La potenza specifica di picco che è in grado di erogare la cella NMC risulta essere al 100 % del SOC circa 2.15 volte superiore: tale valore aumenta al diminuire del SOC in quanto mentre la cella NMC ha mantenuto la corrente di scarica 10 C ai vari livelli del SOC, nel caso della cella LFP a SOC inferiori è stato necessario diminuire la corrente di scarica per evitare che la tensione andasse al di sotto del cut-off. Al SOC 40 % si è ottenuta una potenza specifica di picco 3 volte superiore rispetto alla cella LFP. Un altro vantaggio per la Cella NMC è che le potenze di picco sono state garantite in maniera pressoché costante ai differenti SOC: ciò garantisce una potenza costante erogabile dal pacco batteria installato nei veicoli ibrido indifferentemente dallo stato di carica.

I valori di resistenza interna e di tensione a vuoto ai differenti SOC per le due celle sono riportati nella seguente tabella:

	SOC %	$R_{\Omega imp}$	$R_{\Omega imp}$	$R_{\Omega over}$	$R_{\Omega over}$	OCV	
		Carica	Scarica	Carica	Scarica		
		[m Ω]	[m Ω]	[m Ω]	[m Ω]	[V]	
NMC	100%	0.668	1.435	1.023	2.035	4.190	
	80%	1.171	1.200	1.694	2.106	3.977	
	60%	1.152	1.161	1.652	1.771	3.771	
	40%	1.181	1.194	1.723	1.932	3.665	
	20%	1.319	1.348	2.010	2.145	3.571	
LFP	SOC %	$R_{\Omega imp}$	$R_{\Omega imp}$	$R_{\Omega over}$	$R_{\Omega over}$	OCV	
		Carica	Scarica	Carica	Scarica		
			[m Ω]	[m Ω]	[m Ω]	[m Ω]	[V]
	100%	1.288	2.198	11.825	3.343	3.756	
	80%	2.268	2.235	3.030	3.065	3.303	
	60%	2.343	2.328	3.188	3.188	3.33	
40%	2.317	2.388	3.195	3.395	3.291		
20%	2.280	2.503	3.220	3.737	3.24		

Tabella 75 - Resistenza interna e tensione ai differenti SOC a confronto

Come detto la resistenza interna è un parametro importante per la conoscenza dei fenomeni di riscaldamento e di perdita di efficienza della batteria: più il suo valore è elevato più saranno elevate le perdite. Dalla tabella sopra si nota una resistenza interna ai vari livelli di SOC di circa il 50 % in meno nel caso della cella NMC rispetto alla LFP, sia in carica che in scarica, sia

per la resistenza impulsiva che per quella globale. Inoltre la cella NMC presenta ai differenti SOC valori maggiori di tensione a vuoto, garantendo maggiori potenze e allo stesso tempo maggiore energia a parità di corrente di scarica.

Per quel che riguarda l'autoscarica nelle 62 ore la differenza tra le due tecnologie è abissale: la cella LFP presenta un'autoscarica del 8.2 % rispetto alla cella NMC in cui il valore è solo 0.644 %. Ciò incide sulla capacità e l'energia di scarica e conseguentemente sui rendimenti come si può notare nella tabella sottostante:

		CAPACITA' DI SCARICA (Ah)	ENERGIA DI SCARICA (Wh)	RENDIMENTO DI CARICA (%)	RENDIMENTO ENERGETICO (%)
LFP	Dopo 1 ora	47.87	152.1	98.50	90.92
	Dopo 62 ore	46.26	147.73	95.19	88.30
NMC	Dopo 1 ora	32.69	120.36	99.42	95.06
	Dopo 62 ore	32.04	117.57	98.48	94.91

Tabella 76 - Autoscarica a confronto

Mentre la cella NMC riduce di circa 1 % il rendimento di carica, la LFP lo riduce di circa il 3.3 %, così come il rendimento energetico che per la cella NMC si riduce del 0.15 % mentre per la LFP del 2.62 %.

A tutti questi vantaggi la cella NMC presenta alcuni svantaggi in termini di sicurezza.

La tecnologia a base di fosfati della LFP possiede infatti un'eccellente stabilità termica e chimica, che fornisce caratteristiche di sicurezza superiori rispetto alle NMC. Le celle LFP sono infatti incombustibili in caso di maltrattamenti durante la carica o la scarica, sono più stabili in condizioni di sovraccarico o corto circuito e possono resistere alle alte temperature senza decomporsi. L'intervallo di temperatura quindi è più elevato rispetto alla cella NMC, sia in carica che in scarica, con range che va da -25°C a 75°C, mentre la cella NMC non può essere ricaricata al di sotto dei 0°C e al di sopra dei 40°C e deve essere scaricata nel range -20°C e 60°C. Inoltre la Cella NMC ha bisogno di essere conservata a temperatura non troppo alte per rallentare la degradazione nel tempo.

Il numero di cicli vita che riducono la capacità di carica al 80 % è maggiore per le celle LFP (2000 cicli circa) e la vita di entrambe le celle dipende dal tempo trascorso dopo la fabbricazione, con un notevole decadimento delle prestazioni dopo 2-3 anni.

Allegato 2 - POSSIBILITÀ DI ESTENSIONE DELL'ELETTRIFICAZIONE AL MERCATO DEI VEICOLI OFF-ROAD

Introduzione

A fianco del "grande elettrico", quello per intenderci delle grandi case, esiste anche un elettrico "medio" e "piccolo", costituito dalla piccola e media industria operante nel settore, con nomi conosciuti internazionalmente come Ansaldo, Carraro, BredaMenarini, Microvett, Oxygen, CNH per le applicazioni alle macchine operatrici e agricole.

Questo è un settore in cui l'industria nazionale ha una posizione di leadership in Europa, ed occorre preservarlo con uno sforzo congiunto di ricerca e sviluppo, specialmente necessario nel settore dell'accumulo elettrico, che è il componente attualmente più critico. Tra le aziende che già operano in questo settore citiamo l'Arcotronics, la Fiamm, la Faam, la Magneti Marelli.

Esiste inoltre un gran numero di aziende, medio/piccole, operanti nei settori delle macchine per cantiere edile, per il giardinaggio, per la pulizia delle strade, per il movimento terra, macchine per orticoltura e serre agricole, che utilizzano per i mezzi di loro produzione motorizzazioni diesel ed a benzina, di produzione nazionale e non. (Lombardini, Honda, etc.)

L'estensione dell'elettrificazione ai settori "non stradali", con una doppia valenza, ambientale ed energetica, potrebbe aprire spazi di mercato non trascurabili, con potenzialità equivalenti all'immissione sul mercato di decine di migliaia di auto elettriche all'anno.

Inoltre, come in passato si è reso obbligatorio l'uso di carrelli elevatori azionati elettricamente per lavorare in ambienti chiusi, potrebbe in futuro accadere lo stesso per aree come:

- all'interno o nelle vicinanze di ospedali, case di riposo, scuole, luoghi turistici, parchi tematici,
- centri storici delle città
- interno delle serre, stalle, magazzini, ecc.

ed in generale in tutte le aree dove l'inquinamento ambientale ed acustico sono un problema.

Di fatto, per alcune tipologie di mezzi, come le piattaforme elevatrici e spazzatrici, esistono già prodotti, nazionali e non, elettrificati con batterie litio-ioni.

Per il complesso di ragioni sopra indicate, si è effettuato uno studio tecnico-economico per la valutazione del potenziale mercato dei mezzi off-road in versione elettrica, che costituisce l'oggetto del presente rapporto, sviluppato congiuntamente da ENEA e MICROVETT.

Razionale di carattere energetico-ambientale a favore della trazione elettrica

Nella tabella che segue un confronto tra le attuali motorizzazioni diesel-elettriche per veicoli industriali/macchine operatrici, che evidenzia la superiorità dell'elettrico e dal punto di vista dei consumi energetici "dal pozzo alla ruota" e dal punto di vista dell'impatto globale (CO₂).

	DIESEL		
Rendimento medio diesel di piccola potenza			25%
Rendimento medio trasmissione idraulica			70%
Rendimento medio all'utenza su cicli reali			17,5%
Fattore di emissione CO ₂ in kg/kg gasolio			3,16
Fattore di emissione CO ₂ in g/kWh gasolio			263
Fattore di emissione CO₂ alle ruote [g/kWh]			1501
	ELETTRICO		
Rendimento di generazione (valor medio per il parco italiano)			48%
Rendimento di distribuzione/trasformazione a 380 V c.a.			92%
Rendimento di conversione ca/cc e di carica/scarica batterie			80%
Rendimento medio dell'azionamento			85%
Rendimento medio all'utenza su cicli reali			30,0%
TIPOLOGIA DI CENTRALE	Mix italiano	Combinato	Turbogas
Fattore di emissione CO ₂ in g/kWh elettrici	519	400	730
Fattore di emissione CO₂ alle ruote [g/kWh]	830	639	1106
Differenze percentuali			
Variazione % fattore di emissione CO₂ all'utenza vs. diesel	-45%	-57%	-26%
Variazione % rendimento energetico alle ruote vs. diesel		71%	

Tutti i rendimenti a bordo veicolo, sia con la trasmissione idraulica che con quella elettrica, sono stimati, per l'eterogeneità delle tipologie veicolari considerate. I cicli sono comunque più discontinui rispetto alle auto, con un prevedibile peggioramento del funzionamento del diesel

In sintesi, possiamo dire:

- le emissioni di gas serra dei veicoli a batteria sono ridotte del 40-50% rispetto al diesel
- il rendimento alle ruote migliora tanto (del 70% circa) da quasi raddoppiare,
- le emissioni al suolo di inquinanti tossici e nocivi dovuti alla motorizzazione sono praticamente nulle. Restano a carico degli elettrici solo le emissioni di particolato dovute all'usura dei pneumatici, analogamente a tutte le altre tipologie di veicoli;
- le emissioni acustiche degli elettrici sono inferiori di 5-6 dB(A)
- il notevole incremento del costo di acquisto viene bilanciato dalla riduzione dei costi di esercizio, in misura strettamente dipendente dal costo "a fine vita" delle batterie, al momento non è prevedibile, mancando dati sperimentali e di esercizio per questa particolare applicazione.

Metodologia adottata

Si è deciso di procedere secondo la seguente metodologia

1. scegliere i settori merceologici potenzialmente interessanti per questo studio
2. valutare quali potevano essere le aziende italiane più significative
3. ricercare i mezzi ritenuti più adatti ad essere azionati elettricamente
4. dimensionare preliminarmente i pacchi batteria necessari per le diverse categorie di mezzi
5. individuare uno o più moduli standard che consentissero la composizione dei diversi pacchi, considerando anche una ridotta variabilità dei livelli di tensione da adottare
6. stimare le percentuali di vendita al 2020 per i diversi settori merceologici
7. calcolare conseguentemente i volumi di vendita prevedibili, in kWh ed in Euro

Punto "zero" è stata l'indagine dello stato dell'arte, cioè la verifica di quanto è già disponibile sul mercato.

Stato dell'arte: schede tecniche di alcuni mezzi elettrici sul mercato

Durante la ricerca sono stati individuati, già disponibili sul mercato, svariati tipi di macchine azionate elettricamente, di cui riportiamo qui di seguito alcuni esempi.

MINIDUMPER

HINOWA Modello HS 400 Motore elettrico: ASINCRONO Potenza lorda max.: 2 kW a 3100 g/1'; Larghezza: 790 mm; Altezza: 1162 mm; Lunghezza: 1676 mm; Capacità cassone: 0,115 m³; Peso con cassone autocaricante: 640 kg; Peso con cassone edile: 600 kg; PORTATA 300 kg max.



PIATTAFORME AEREE

HINOWA Modello GOLDLIFT 14.70 LITHIUM-ION Motore elettrico 2kW/48V; Tensione impianto elettrico 48V-12V; Dimensioni cm 180x72x37; Rulli per lato 3 + slitta. Carreggiata del passo variabile 786 / 1086 mm; Velocità di traslazione 1,4 km/h; Peso Operativo Kg 1790; Pendenza Max Superabile 18,5°(33,5%); Velocità Max Vento 12,5 m/s



SPAZZATRICI

U.C.M. SRL (azienda del gruppo UNIECO) Modello 360 Electrica



TRAZIONE con motori elettrici asincroni a corrente alternata sulle ruote posteriori; Potenza motori 5 kW in servizio continuo; Batterie No. 2, 48 V, 650 Ah, scarrabili; Tempo ricarica 5/8 h.

DIMENSIONI: Lunghezza mm 2.775, Larghezza mm 980, Altezza mm 1.860

COMPATTATORI RIFIUTI

OMB INTERNATIONAL Srl Modello CM 1900 IBRIDO

(unico esemplare costruito con FCC, per la Municipalità di Madrid)

La soluzione adottata da FCC, uno dei leader europei della raccolta rifiuti, è quella di uno chassis elettrico/ibrido. Si tratta di un veicolo ZEV (zero emissions vehicle) in grado di funzionare in forma totalmente elettrica durante l'attività di raccolta, trasformandosi in una situazione "ibrida" quando, in fase di trasferimento verso un veicolo "madre" ricarica completamente le sue batterie, in un tempo inferiore ai 20 minuti, attraverso il funzionamento di un motore termico e di un generatore.



Il telaio è stato studiato per ridurre la sua carreggiata massima in un valore inferiore ai 2 metri. Su questa avveniristica base telaistica si è montato un compattatore posteriore OMB modello CM1900 caratterizzato da altissimi valori di compattazione che mantengono entro limiti e oltremodo ridotti gli ingombri del veicolo carrozzato:

6,5 x 1.800 x 3,2 con un PMA di 15 ton e un carico utile di circa 4.000 Kg. Che garantisce quindi, pur in questa soluzione progettuale avveniristica, dei rendimenti e dei carichi comparabili se non addirittura superiori a quelli di veicoli con motori termici convenzionali

Settori merceologici considerati

A. MACCHINE PER CANTIERE EDILE

- Caricatori a bracci telescopici
- Mini trasportatori/Minidumper
- Piattaforme aeree

B. MACCHINE PER IL GIARDINAGGIO

- Decespugliatori
- Mezzi fuoristrada x giardinaggio
- Motofalciatrici con barra centrale/laterale
- Tosatrici da prato c/conducente seduto
- Carrello da golf

C. MACCHINE PER LA PULIZIA DELLE STRADE

- Compattatori
- Pulitrici strade
- Soffiatori x foglie

D. MACCHINE AGRICOLE

- Carri raccolta e potatura
- Irroratrici semoventi
- Trattori a cingoli e/o a ruote
- Macchine agevolatrici

E. MACCHINE MOVIMENTO TERRA

- Terne gommate
- Mini Escavatori (< 4 Ton)
- Skid Loader (pale compatte)
- Pale gommate (< 1 mc)
- Mini crawler crane (mini gru cingolate)

F. MACCHINE PER ORTICOLTURA E SERRE

- Trattori orticoltura
- Motocoltivatori
- Motozappatrici
- Forbici/sbattitori

G. MACCHINE PER LA NEVE

- Gatto delle nevi (per sistemazione delle piste)
- Motoslitta

Selezione delle macchine, dimensionamento preliminare e scelta dei moduli/livelli di tensione standard

La ricerca del mezzo/macchina più adatta al nostro scopo è stata sicuramente impegnativa perché è stato necessario controllare la gamma delle macchine prodotte dal singolo costruttore e selezionare/individuare quella o quelle maggiormente adatte per la elettrificazione con batterie.

Lo studio è stato concentrato sulle motorizzazioni, tipicamente di potenza medio/bassa, potenzialmente sostituibili con motorizzazioni "a batteria" di tipo innovativo. Sono state quindi escluse le motorizzazioni con potenze elevate o cicli di lavoro tali da poter essere affrontate solo con motorizzazioni ibride o con dei costi troppo elevati per la grande quantità di batterie al litio necessarie al loro funzionamento.

Per avere una sufficiente comparazione tra le macchine, mediamente sono stati presi in considerazione tre modelli simili prodotti da tre diverse case costruttrici.

TIPO DI MACCHINA	MODELLO O TIPO	Costruttori (in Italia)
MACCHINE PER CANTIERE EDILE		
Caricatori a bracci telescopici	P 25.6	MERLO SpA
Caricatori a bracci telescopici	MLT 731 Turbo	MANITOU Costruzioni Industriali Srl
Caricatori a bracci telescopici	LM1330/LM1333	CNH ITALIA CONSTRUCTION MACHINERY SpA
Mini trasportatori/Minidumper	Rossetto TRV 10	F.lli MESSERSI' SpA
Mini trasportatori/Minidumper	HS 400 (elettrico)	HINOWA SpA
Mini trasportatori/Minidumper	Serie 50	CORMIDI Srl
Mini trasportatori/Minidumper	Cingo M 10.2 plus	MERLO SpA
Piattaforme aeree	C 12.65	CORMIDI Srl
Piattaforme aeree	Octopussy 1500 evo	OIL&STEEL SpA
Piattaforme aeree	Goldlift 14,70 Lithium	HINOWA SpA
MACCHINE PER IL GIARDINAGGIO		
Decespugliatori	STIHL FR 480	ANDREAS STIHL SpA
Decespugliatori	Premium BCF 420/453 BP ERGO	OLEO-MAC (gruppo Emak SpA)
Decespugliatori	RM 410ES/510ES	CORMIK SpA
Mezzi fuoristrada x giardinaggio	PK 600	GRILLO SPA
Mezzi fuoristrada x giardinaggio	200 DK 4x4	ALKE'
Mezzi fuoristrada x giardinaggio	Tigrecar	ANTONIO CARRARO SpA
Mezzi fuoristrada x giardinaggio	Tigrecar più	ANTONIO CARRARO SpA
Motofalciatrici con barra centrale/laterale	630 WS MAX	BCS SpA
Motofalciatrici con barra centrale/laterale	ACF 202	ADRIATICA MACCHINE AGRICOLE Srl
Tosatrici da prato c/conducente seduto	220D	GIANNI FERRARI Srl
Tosatrici da prato c/conducente	Climber 7.10	GRILLO SpA

seduto		
Tosatrici da prato c/conducente seduto	SP 4400 HST	ANTONIO CARRARO SpA
Tosatrici da prato c/conducente seduto	MA.TRA 205	BCS SpA
Carrello da golf	TORO + altro	ALKE'
Carrello da golf	Kudo 6022K	T.G.S. Tecno Golf Service srl
MACCHINE PER LA PULIZIA DELLE STRADE		
Compattatori	MINICOMPATTATORE	POR.CELLI Srl
Compattatori	CM 1900 IBRIDO	OMB INTERNATIONAL Srl
Compattatori	Volvo FE Hybrid	VOLVO TRUKS
Pulitrici strade	DULEVO	DULEVO INTERNATIONAL SpA
Pulitrici strade	Patrol	RCM SpA
Pulitrici strade	360 elettrica	U.C.M. (Unieco) Srl
Soffiatori/aspiratori x foglie	STIHL BGE 71 e 81	ANDREAS STIHL SpA
Soffiatori/aspiratori x foglie	BV 162	OLEO-MAC (gruppo Emak SpA)
MACCHINE AGRICOLE		
Carri raccolta e potatura	ZIP25/Carrier/Senior	BLOSI Snc
Carri raccolta e potatura	M9 s.compact/HF3000	F.lli FESTI
Irroratrici semoventi	IBIS 1500 LM	MAZZOTTI s.r.l.
Irroratrici semoventi	Serie GK	GRIM Srl
Irroratrici semoventi	Grimac JR	BARGAM S.p.A.
Trattori a cingoli e/o a ruote	Agrolux 310/320	SAME DEUTZ-FAHR Italia
Trattori a cingoli e/o a ruote	Supertigre 5500	ANTONIO CARRARO SpA
Trattori a cingoli e/o a ruote	VP3600 GE	ARGO TRACTORS SpA - VALPADANA
Macchine agevolatrici	Elektrotrans 800	OELLE COSTRUZIONI MECCANICHE srl
Macchine agevolatrici	ecogreenitalia	LEOZANN Srl
Macchine agevolatrici	Carryall 232 Elettrico	ANTONIO CARRARO SpA
Macchine agevolatrici	Climb Cart 108 E 800-R4	EsseP.Tecno di Sasia & C
MACCHINE MOVIMENTO TERRA		
Terne gommate	6.23B/1.33B	VF VENIERI SpA
Terne gommate	pb30/pb50/pb70	PALAZZANI INDUSTRIE SpA
Terne gommate	E265	SAMPIERANA SpA
Mini Escavatori (< 4 Ton)	M22U	F.lli MESSERSI' SpA
Mini Escavatori (< 4 Ton)	ES150.5SR/ES300SR	SAMPIERANA SpA
Mini Escavatori (< 4 Ton)	218 SV/224S	CAMS MACCHINE S.A. (ex Libra)
Skid Loader (pale compatte)	SL35/SL45	F.lli MESSERSI' SpA
Skid Loader (pale compatte)	SK130.4/SK150.4	SAMPIERANA SpA
Skid Loader (pale compatte)	CL35/CL45	IMER INTERNATIONAL SpA
Skid Loader (pale compatte)	755	CAMS MACCHINE S.A. (ex Libra)
Pale gommate (< 1 mc)	263B Plus	VF VENIERI SpA
Pale gommate (< 1 mc)	pl145	PALAZZANI INDUSTRIE SpA
Pale gommate (< 1 mc)	AL250/AL450	FIORI SpA
Mini crawler crane	SPD265C/SPD360C	ORMET SpA (IMAI)
MACCHINE PER ORTICOLTURA E		

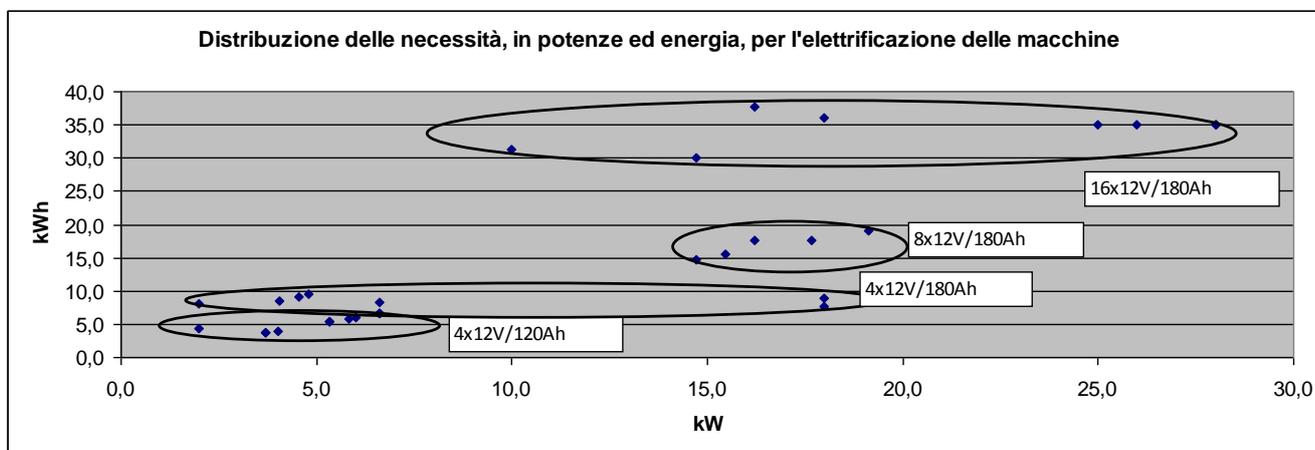
SERRE		
Trattori orticoltura	STAR 3000	GOLDONI SpA
Trattori orticoltura	TRX 9800	ANTONIO CARRARO SpA
Motocoltivatori	MTC 621	MECCANICA BENASSI SpA
Motocoltivatori	410	EMAK SpA Bertolini
Motocoltivatori	G 45	GRILLO SpA
Motozappatrici	RL 308	MECCANICA BENASSI SpA
Motozappatrici	MZ 2100 R	EMAK SpA
Motozappatrici	12000	GRILLO SpA
Forbici/sbattitori	lixion/selion	Pellenc Italia Srl
Forbici/sbattitori	Alice	Campagnola Srl
MACCHINE PER LA NEVE		
Gatto delle nevi (compattatori delle piste)	Trooper	LEITNER Technologies SpA
Motoslitta	Lynx Xtrim SC 600 H.O. E-TEC	LEITNER Technologies SpA

Lo studio delle macchine oggetto del nostro lavoro, con le loro specifiche tecniche, ci ha quindi permesso di fotografare quella che è oggi l'offerta potenziale di sistemi di propulsione/generazione di bordo (motorizzazioni termiche ed elettriche con batterie al piombo o al litio) in termini di potenza nominale ed autonomia energetica.

Per ciascuno dei mezzi sopra elencati (64 mezzi diversi) si è quindi dimensionato preliminarmente (in kWh e kW) il pacco batterie ritenuto adatto alla particolare applicazione, stimando il tempo di funzionamento tra una ricarica e la successiva e la potenza media impegnata, come frazione della potenza massima disponibile.

In alcuni casi, la scelta è stata facilitata dalla presenza sul mercato di versioni già elettrificate di mezzi convenzionali.

Il risultato dello studio, rappresentato schematicamente dalla figura sotto riportata, è stata l'individuazione di due taglie di moduli, da 120 Ah e da 180 Ah, e di tre livelli di tensione, 48, 96 e 192 V, che, diversamente combinati, soddisfano tutte le esigenze dell'elettrificazione dei mezzi.



In figura sono messi a confronto gli ingombri, a parità di contenuto energetico, di una batteria 12 V/100 Ah, Li-io a sinistra, piombo-acido a destra. I pesi sono rispettivamente 15,8 kg e 42,2 kg, con una riduzione del 62%: il miglioramento è evidente!



Prospetto della proposta di elettrificazione

Si riporta di seguito un prospetto dove, macchina per, macchina, è indicata una prima ipotesi di pacco batteria

Modello o tipo	Energia pacco batterie (KWh)	Composizione pacco batteria	Costo del pacco batterie (a 400 Euro/kWh)	Peso in kg del pacco batteria (100 Wh/kg)	Volume in L del pacco batteria (150 Wh/L)
MACCHINE DA CANTIERE EDILE					
P 25.6	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
MLT 731 Turbo	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
LM1330/LM1333	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
Rossetto TRV 10	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
HS 400 (elettrico)	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
Serie 50	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
Cingo M 10.2 plus	35	24x12V/120Ah	14000	350	233
Merlo Cingo M 6.2 plus *	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
C 12.65	6	4x12V/120Ah	2304	58	38
Octopussy 1500 evo	6	4x12V/120Ah	2304	58	38
Goldlift 14,70 Lithium	6	4x12V/120Ah	2304	58	38
MACCHINE MOVIMENTO TERRA					
			0	0	0
6.23B/1.33B	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
pb30/pb50/pb70	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
E265	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
M22U	17	8x12V/180Ah	7000	170	113
ES150.5SR/ES300SR	17	8x12V/180Ah	7000	170	113
218 SV/224S	17	8x12V/180Ah	7000	170	113
SL35/SL45	17	8x12V/180Ah	7000	170	113
SK130.4/SK150.4	17	8x12V/180Ah	7000	170	113
CL35/CL45	17	8x12V/180Ah	7000	170	113
755	17	8x12V/180Ah	6800	170	113
263B Plus	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
p1145	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
AL250/AL450	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
SPD265C/SPD360C	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
MACCHINE PER LA PULIZIA DELLE STRADE					
			0	0	0
MINICOMPATTATORE	17	8x12V/180Ah	7000	170	113

DULEVO	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
Patrol	35	24x12V/120Ah	14000	350	233
360 elettrica	17	8x12V/180Ah	6800	170	113
MACCHINE PER IL GIARDINAGGIO			0	0	0
PK 600	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
200 DK 4x4	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
Tigrekar	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
Tigrekar più	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
630 WS MAX	6	4x12V/120Ah	2304	58	38
ACF 202	6	4x12V/120Ah	2304	58	38
220D	35	16x12V/180Ah	14000	346	230
Climber 7.10	17	8x12V/180Ah	7000	173	115
SP 4400 HST	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
MA.TRA 205	17	8x12V/180Ah	7000	173	115
TORO + altro	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
Kudo 6022K	9	4x12V/180Ah	3456	86	58
MACCHINE AGRICOLE			0	0	0
ZIP25/Carrier/Senior	17	8x12V/180Ah	7000	173	115
M9 s.compact/HF3000	17	8x12V/180Ah	7000	173	115
IBIS 1500 LM	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
Serie GK	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
Grimac JR	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
Agrolux 310/320	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
Supertigre 5500	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
VP3600 GE	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
Elektrotrans 800	6	4x12V/120Ah	2304	58	38
ecogreenitalia	6	4x12V/120Ah	2304	58	38
Carryall 232 Elettrico	6	4x12V/120Ah	2304	58	38
Climb Cart 108 E 800-R4	6	4x12V/120Ah	2304	58	38
MACCHINE PER ORTICOLTURA E SERRE			0	0	0
STAR 3000	17	8x12V/180Ah	7000	170	113
TRX 9800	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
MTC 621	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
410	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
G 45	9	4x12V/180Ah	3600	90	60
RL 308	6	4x12V/120Ah	2304	58	38
MZ 2100 R	6	4x12V/120Ah	2304	58	38
12000	6	4x12V/120Ah	2304	58	38
MACCHINE PER LA NEVE			0	0	0

Lynx Xtrim SC 600 H.O. E-TEC	35	16x12V/180Ah	14000	350	233
-------------------------------------	----	--------------	-------	-----	-----

Studio del mercato potenziale

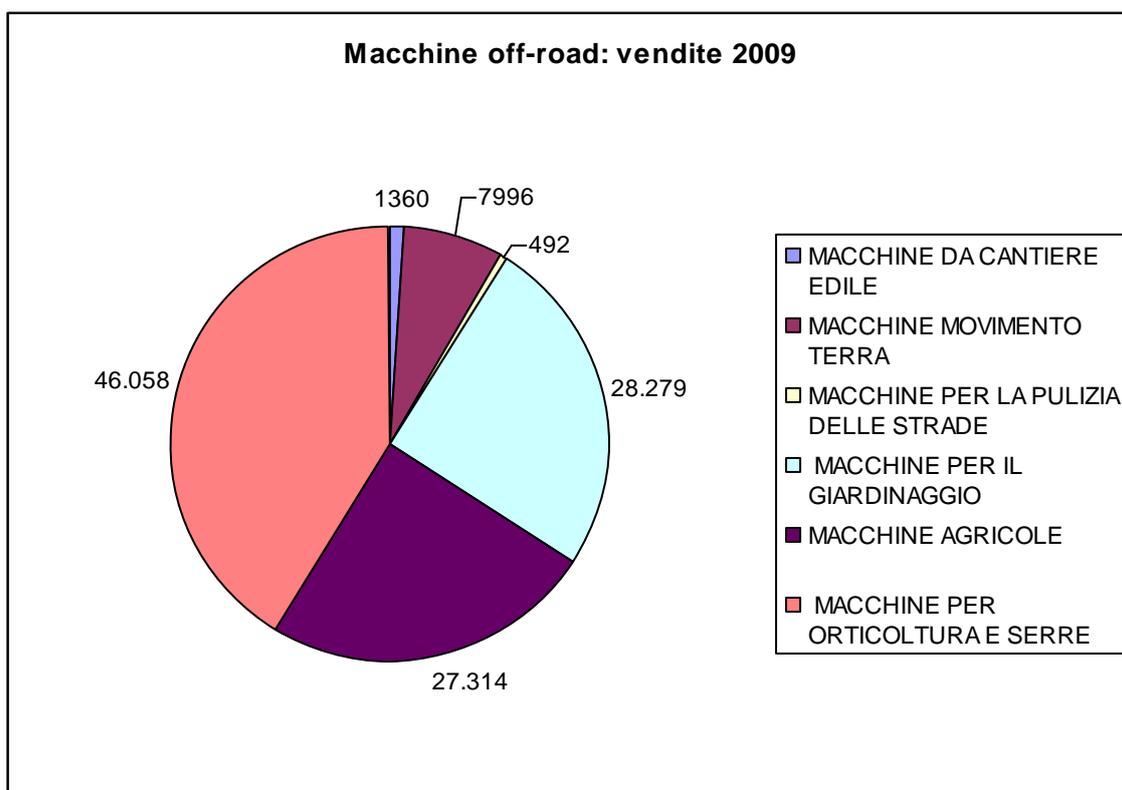
Abbiamo preso i contatti con quasi tutte le case costruttrici onde avere ulteriori informazioni sulle macchine, sul mercato attuale e sulla tendenza nei confronti delle macchine elettrificate.

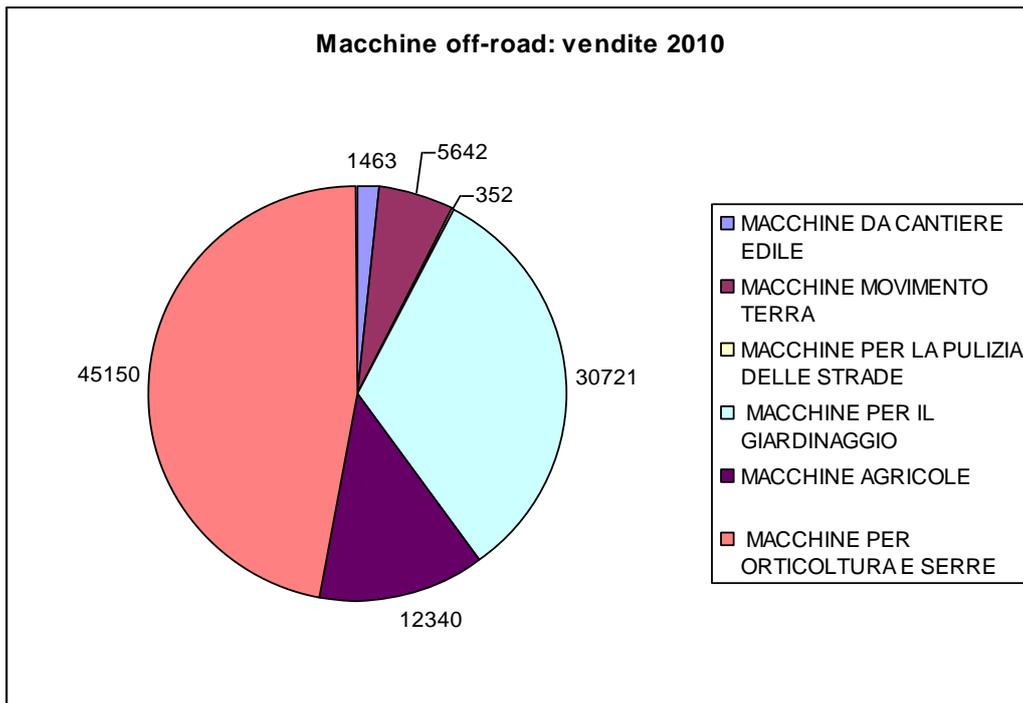
Sono state effettuate numerose telefonate, soprattutto ai responsabili Marketing, Commerciali o agli stessi proprietari nel caso di piccole Aziende e inviato e-mail per presentare il lavoro che si stava facendo e per chiedere collaborazione nel fornire le dovute informazioni.

A tal proposito è stato preparato anche un apposito documento inviato ai costruttori con il quale chiedevamo informazioni sull'azienda e sui loro prodotti che ritenevano essere più adatti ad essere elettrificati.

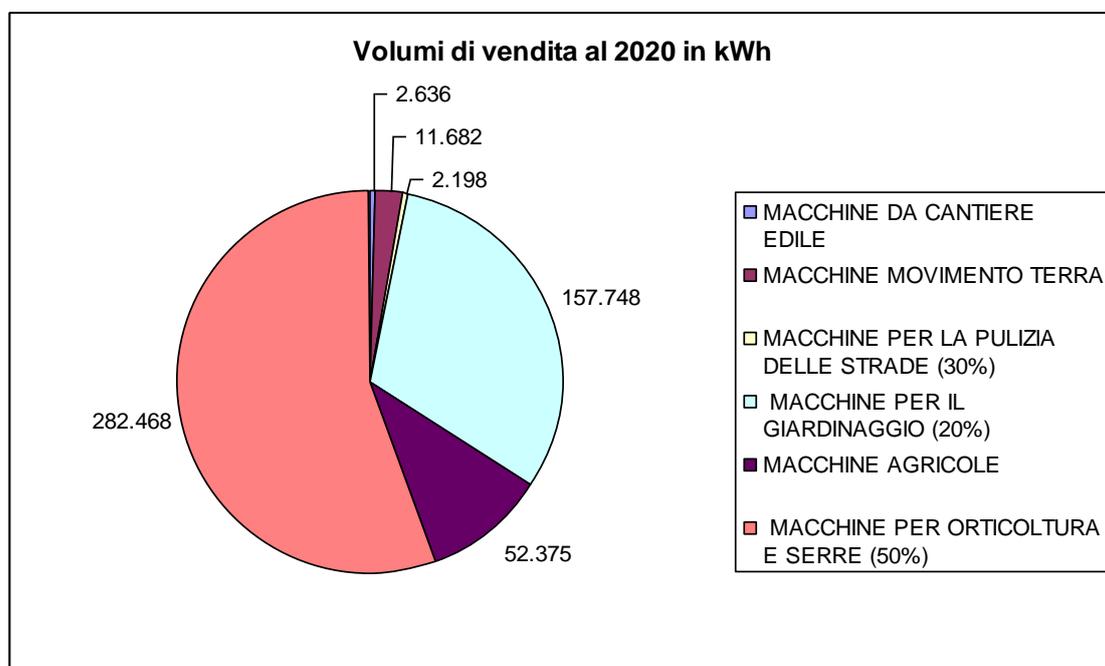
Si sono quindi esaminati gli attuali ambiti di azione delle macchine azionate da batterie cercando di capire qual è la loro "vendibilità" e qual è l'andamento del trend di questo tipo di mercato.

Alcune Associazioni dei costruttori e/o le aziende stesse ci hanno fornito i dati sul mercato italiano attuale per permetterci una valutazione sui mezzi venduti ogni anno, riportato in fig. per il 2009 ed il 2010.





Conoscendo i dati di vendita annuale dei mezzi, la tipologia ed il numero delle batterie al litio necessarie al funzionamento di ogni singola macchina, nell'ipotesi che la produzione di mezzi azionati elettricamente sia solo il 10% del mercato totale (ove non diversamente indicato) si può ricavare qual è il potenziale volume di vendita al 2020 per i diversi settori, espresso in kWh e riportato in figura:



Volume di vendita potenziale per anno delle batterie al litio per mezzi off-road, in Italia, al 2020: 509.106 kWh.

Al costo unitario di 400 €/kWh, previsto come obiettivo di costo per le batterie di trazione, questi volumi corrispondono ad un fatturato di oltre 200 ML €. In termini di autovetture elettriche equivalenti, ponendo in 25 kWh il contenuto energetico della batteria di un'autovettura di classe media, il mercato off-road al 2020 varrebbe quindi circa 20.000 autovetture elettriche. Considerato che a quella data si stima una penetrazione del puro elettrico sul mercato dell'auto nell'ordine del 3-4%, il mercato parallelo così delineato vale tra il 25 ed il 30% del mercato automobilistico.

Problemi rilevati dal confronto con l'industria

Si desidera sottolineare che in occasione dei vari contatti con le aziende costruttrici si è ricevuta la netta sensazione che il mercato sia disponibile a questo tipo di macchine che vengono recepite come macchine eco-sostenibili.

Alcuni problemi che si contrappongono a questa espansione vengono qui di seguito elencati:

A. Elevato costo iniziale delle macchine/mezzi causato dall'elevato costo delle batterie al litio (serbatoio delle macchine). Questo è un grande ostacolo all'acquisto in quanto l'investimento iniziale si ripaga solo dopo svariati anni pur essendo il costo della ricarica delle batterie molto basso ed il numero delle ricariche molto elevato.

Alla luce dell'esperienza pregressa, si può ritenere che un valido argomento per conseguire la diminuzione dei prezzi è rappresentato dalla modularità: l'adozione di elementi modulari standard, consentirebbe ad un ipotetico operatore economico di poter soddisfare le esigenze delle varie applicazioni gestendo un medesimo prodotto e ciò si tradurrebbe in alti volumi di produzione, o acquisto, e quindi in un contenimento dei prezzi. La modularità, associata all'impiego di moduli di piccola taglia e ad un insieme di infrastrutture di ricarica, permetterebbe anche di conseguire una riduzione del peso del pacco batterie, altro fattore limitante, in quanto peggiorativo dei consumi chilometrici. Lo studio da noi effettuato dimostra la possibilità di questa razionalizzazione.

B. La limitata autonomia delle macchine azionate elettricamente può essere superata considerando:

- a. La possibile rapida sostituzione del serbatoio energetico
- b. Viste le caratteristiche delle moderne batterie al litio, disponendo di grande potenza elettrica a livello di rete, è possibile alimentare le macchine con "biberonaggi" (ricariche parziali) che permettono di ricaricare in un ora l'80% del contenuto energetico del serbatoio.

C. I Costruttori tendenzialmente sono portati a "trasformare" in elettriche le macchine partendo dalle macchine azionate con i motori a combustione interna che hanno già di per sé delle difficoltà intrinseche dovute alla limitazione degli ingombri disponibili per le batterie ed agli azionamenti meccanici tradizionali.

Le future macchine azionate elettricamente dovranno essere progettate, fin dal primo momento, considerando tutte le caratteristiche dei motori elettrici e degli azionamenti della macchina onde ottenere le migliori prestazioni con la minima dispersione di energia.

Conclusioni

Possiamo in conclusione affermare che:

- i costi attuali delle batterie al litio non consentono una massiccia diffusione dei sistemi elettrici, per cui, vista anche l'assenza di produttori nazionali di batterie avanzate, si rende necessario un ulteriore sforzo di ricerca e sviluppo mirato a creare le giuste potenzialità per la penetrazione del mercato.
- I costruttori di quasi tutte le tipologie di macchine in esame confermano l'attenzione e l'interesse del loro specifico mercato di disporre di mezzi ad azionamento elettrico azionati da batterie, in particolare l'uso di batterie al litio, per avere mezzi elettrici senza linea aerea. L'utilizzo di questi mezzi viene considerato come l'approccio più promettente per la soluzione dei problemi di carattere ambientale e l'esigenza di diversificazione delle fonti di energia.

Pensiamo che non sia da scartare l'idea di avere un centro specializzato nella progettazione e costruzione delle macchine azionate elettricamente perché porterebbe un grande valore aggiunto all'intero paese, in quanto concentrerebbe in un unico centro il know how delle batterie al litio per essere in grado di utilizzare al massimo le loro performances.

In un mondo globalizzato, la singola azienda non può pensare di riuscire a sviluppare da sola la migliore tecnologia per un settore nuovo e tecnologicamente avanzato come può essere l'abbinamento corretto delle batterie al litio/ioni al motore elettrico per ogni tipologia di macchine.

L'alta specializzazione che questo centro potrebbe creare verrebbe riversata a cascata sulle aziende costruttrici che, dopo aver costruito in questo centro i prototipi delle loro macchine fino alla pre-produzione industriale diventerebbero padroni della migliore tecnologia del settore e quindi in grado di produrre loro stessi le macchine elettrificate.

ALLEGATO A: aziende italiane considerate nel ns. studio

ADRIATICA MACCHINE AGRICOLE Srl

Via Benedetto Croce, 3/D
47039 Savignano Sul Rubicone (FC)
Tel. 0541 809147 e.mail info@adriatica-grifo.it

ALKE' Srl

via Vigonovese 123
35127 Padova (PD)
Tel. 049 761208 e.mail info@alke.it

ANDREAS STIHL SpA

Viale delle Industrie, 15
20040 Cambiago (MI)
Tel. 02 950681 e.mail roberta.malvicini@stihl.it

ANTONIO CARRARO SpA

Via Caltana, n.24
35011 CAMPODARSEGO (PD)
Tel. 049 9219921 e.mail info@antoniocarraro.it

ARGO TRACTORS SpA – VALPADANA

via Matteotti, 7
42042 Fabbrico (RE)
Tel. 0522 656111 e.mail info@valpadana.it

BARGAM SpA

Via della Cooperazione, 20
40026 Imola (BO)
Tel. 0542 648511 e.mail info@bargam.com

BCS SpA

Viale Mazzini, n.161
20081 ABBIATEGRASSO (MI)
Tel. 02 94821 e.mail bcf@bcs-ferrari.it

BLOSI Snc

Via di Vittorio, 18
48026 Russi (RA)
Tel. 0544 583473 e.mail info@nblosi.com

CAMPAGNOLA Srl

via Lazio 21
40069 Zola Predosa (BO)
Tel. 051 753500 e.mail pastorellig@campagnola.it

CAMS MACCHINE S.A. (ex Libra)

Strada del Lavoro 40
47892 Gualdicciolo Rep. San Marino
Tel. 0549 999008 e.mail commerciale@camsmacchine.com

CNH ITALIA CONSTRUCTION MACHINERY SpA

Strada di Settimo, 323

10099 SAN MAURO TORINESE (TO)
Tel. 011 0077111 e.mail alberto.ciravegna@cnh.com

CORMIDI SRL
Via Seude, loc. Fonte
84050 Roccadaspide (SA)
Tel. 0828 943688 e.mail ufficio.tecnico@cormidi.com

CORMIK SpA
Via Retrone, 4/6
36077 Altavilla Vicentina (VI)
Tel. 0444 220611 e.mail commerciale@cormik.it

DULEVO INTERNATIONAL SpA
Via Giovannino Guareschi, 1
43012 Fontanellato (PR)
Tel. 0521 827711 e.mail c.peterlini@dulevo.com

EMAK SpA
Via Fermi, n.4
42011 BAGNOLO IN PIANO (RE)
Tel. 0522 956611 e.mail info@emak.it

EsseP.Tecno di Sasia & C
Via Drago, 75
12030 Villanovetta di Verzuolo (CN)
Tel. 0175 490206 e.mail info@climbcart.com

FARID Industrie SpA
Via Moncalieri 109, Loc. Tetti Cagliari
10048 Vinovo (TO)
Tel. 011 9737301 e.mail alberto.scotti@faridindustrie.it

F.LLI FESTI di FESTI ROBERTO & C. snc
Via A.B. Sabin, 4
44020 Gallo (FE)
Tel. 0532 820017 e.mail info@fratellifesti.it

F.lli MESSERSI' SpA
via Arcevese 44
60010 Casine D'Ostra (AN)
Tel. 0171 614111 e.mail info@consulgroup.it

FIORI SpA
Via per Ferrara n7
41034 Finale Emilia (Mo)
Tel. 0535 92357 e.mail fiori@fiori.com

GIANNI FERRARI Srl
Via Vespucci 53
42046 Reggiolo (RE)
Tel. 0522-973697 e.mail info@gianniferrari.com

GOLDONI SpA
Via Canale, n.3
41012 MIGLIARINA DI CARPI (MO)

Tel. 0522 640111 e.mail marketing@goldoni.com

GRILLO SPA

Via Cervese 1701
47521 CESENA (FC)
Tel. 0547 633111 e.mail grillo@grilloSpA.it

GRIM Srl

Via Novello, 2
60035 Jesi (AN)
Tel. 0731 204796 e.mail info@grimsrl.net

HINOWA SpA

Via Fontana
37054 Nogara (VR)
Tel. 0442 539100 e.mail fturazza@hinowa.com

IMER INTERNATIONAL SpA

via Salceto, 53-55
55036 Poggibonsi (SI)
Tel. 0577 97341 e.mail info@imergroup.com

LEITNER Technologies SpA

Via Brennero 34
39049 Vipiteno (BZ)
Tel. 0472 765512 e.mail intercom@leitner.it

LEOZANN Srl

Via Buttieri, 17
44045 Renazzo - (FE)
Tel. 051 909044 e.mail info@leozann.it

MANITOU Costruzioni Industriali Srl

Via C.Colombo, 2 -Loc.Cavazzona
41013 Castelfranco Emilia (MO)
Tel. 059 959811 e.mail commercialeitalia.mci@manitou.com

MAZZOTTI Srl

Via Dismano, 138/a
48124 Ravenna (RA)
Tel. 0544 64284 e.mail ufficiocommerciale@mazzotti.it

MECCANICA BENASSI SPA

Via Statale n°325
44047 DOSSO (FE)
Tel. 0532 848091 e.mail info@benassi.it

MERLO SPA

Via Nazionale, 9
12020 S. Defendente di Cervasca (CN)
Tel. 0171 614 111 e.mail info@merlo.com

OELLE COSTRUZIONI MECCANICHE srl

Via Dante Alighieri, 14/16

84077 TORRE ORSAIA (SA)
Tel. 0974 985134 e.mail oelle@oelle.it

OIL&STEEL SpA

Via G. Verdi 22
41018 San Cesario sul Panaro (MO)
Tel. 059 936811 e.mail catia_polli@oilsteel.it

OLEO-MAC SpA (gruppo Emak SpA)

Via E. Fermi, 4
42011 Bagnolo in Piano (RE)
Tel. 0522 956611 e.mail info@emak.it

OMB INTERNATIONAL Srl

via Buffalora, 8
25135 Brescia (BS)
Tel. 030 3697711 e.mail commerciale@ombinternational.it

ORMET SpA (IMAI)

via Campardone, 7 Z.I
Colle Umberto (TV)
Tel. 0438 430171 e.mail info@jekko.it

PALAZZANI INDUSTRIE SpA

via del Pavione, 4
25050 Paderno F.C. (BS)
Tel. 030 6857073 e.mail info@palazzani.it

PELLENC Italia Srl

Loc. Pian Dell'Olmino, 82/2
53034 Colle Val D'Elsa - (SI)
Tel. 0577 904950 e.mail p.salvestrini@pellencitalia.com

POR.CELLI Srl

v. G.Rossa, 23
46020 Pegognaga (MN)
Tel. 0376 558250 e.mail info@officineporcelli.com

RCM SpA

via Tiraboschi 4
41043 Casinalbo (MO)
Tel. 059 515311 e.mail rbavutti@rcm.it

SAME DEUTZ-FAHR Italia

Viale F. Cassani, 15
24047 Treviglio
Tel. 0363 4211 e.mail info@samedeutz-fahr.com

SAMPIERANA SPA

Via Leonardo Da Vinci, 40
47026 San Piero in Bagno (FC)
Tel. 0543 904211 e.mail albertobertoni@sampierana.com

T.G.S. Tecno Golf Service srl

Via Lago di Vico, 4
36015 Schio (VI)

Tel. 0445 694131 e.mail www.tecnogolf.com

U.C.M. (Unieco) Srl

via Balduina, 3
42010 Rio Saliceto (RE)

Tel. 0522 699421 e.mail ucm@unieco.it

VF VENIERI SpA

V. Piratello, 106
48022 Lugo (RA)

Tel. 0545 90441 e.mail d.muccinelli@fv-venieri.com

VOLVO TRUCKS Volvo FE Hybrid

Jenny Björsne, Corporate Communications

Tel. +46 31 664523 e.mail jenny.bjorsne@volvo.com

ALLEGATO "B": vendite in italia 2009-2010

MACCHINE DI DIVERSI SETTORI MERCEOLOGICI				Modello o tipo
2009		2010		
	Note		MACCHINE DA CANTIERE EDILE	
385	1	395	Caricatori a bracci telescopici (4 h di funzion.al 50% Pmax)	P 25.6
			Caricatori a bracci telescopici (4 h di funzion.al 50% Pmax)	MLT 731 Turbo
			Caricatori a bracci telescopici (4 h di funzion.al 50% Pmax)	LM1330/LM1333
583		645	Mini trasportatori/Minidumper	Rossetto TRV 10
			Mini trasportatori/Minidumper	HS 400 (elettrico)
			Mini trasportatori/Minidumper	Serie 50
			Mini trasportatori/Minidumper	Cingo M 10.2 plus
			Mini trasportatori/Minidumper	Merlo Cingo M 6.2 plus *
392		423	Piattaforme aeree	C 12.65
			Piattaforme aeree	Octopussy 1500 evo
			Piattaforme aeree	Goldlift 14,70 Lithium
			MACCHINE MOVIMENTO TERRA	
537		389	Terne gommate	6.23B/1.33B
			Terne gommate	pb30/pb50/pb70
			Terne gommate	E265
5.250		3.632	Mini Escavatori (< 4 Ton)	M22U
			Mini Escavatori (< 4 Ton)	ES150.5SR/ES300SR
			Mini Escavatori (< 4 Ton)	218 SV/224S
1.544		984	Skid Loader (pale compatte)	SL35/SL45
			Skid Loader (pale compatte)	SK130.4/SK150.4
			Skid Loader (pale compatte)	CL35/CL45
			Skid Loader (pale compatte)	755
600		550	Pale gommate (< 1 mc)	263B Plus
			Pale gommate (< 1 mc)	pl145
			Pale gommate (< 1 mc)	AL250/AL450
65		87	Mini crawler crane	SPD265C/SPD360C
			MACCHINE PER LA PULIZIA DELLE STRADE	
385	2	240	Compattatori	MINICOMPATTATORE
			Compattatori	CM 1900 IBRIDO
			Compattatori	Volvo FE Hybrid

107		112	Pulitrici strade	DULEVO
			Pulitrici strade	Patrol
			Pulitrici strade	360 elettrica
			MACCHINE PER IL GIARDINAGGIO	
2.475		2.337	Mezzi fuoristrada x giardinaggio	PK 600
			Mezzi fuoristrada x giardinaggio	200 DK 4x4
			Mezzi fuoristrada x giardinaggio	Tigreca
			Mezzi fuoristrada x giardinaggio	Tigreca più
2.456		2.281	Motofalciatrici con barra centrale/laterale	630 WS MAX
			Motofalciatrici con barra centrale/laterale	ACF 202
23.273		26.024	Tosatrici da prato c/conducente seduto	220D
			Tosatrici da prato c/conducente seduto	Climber 7.10
			Tosatrici da prato c/conducente seduto	SP 4400 HST
			Tosatrici da prato c/conducente seduto	MA.TRA 205
75		79	Carrello da golf	TORO + altro
			Carrello da golf	Kudo 6022K
			MACCHINE AGRICOLE	
294		324	Carri raccolta e potatura	ZIP25/Carrier/Senior
			Carri raccolta e potatura	M9 s.compact/HF3000
7.128		6.397	Irroratrici semoventi ((4 h di funzion.al 50% Pmax)	IBIS 1500 LM
			Irroratrici semoventi ((4 h di funzion.al 50% Pmax)	Serie GK
			Irroratrici semoventi ((4 h di funzion.al 50% Pmax)	Grimac JR
19.436	3	17.090	Trattori a cingoli e/o a ruote	Agrolux 310/320
			Trattori a cingoli e/o a ruote	Supertigre 5500
			Trattori a cingoli e/o a ruote	VP3600 GE
456		492	Macchine agevolatrici	Elektrotrans 800
			Macchine agevolatrici	ecogreenitalia
			Macchine agevolatrici	Carryall 232 Elettrico
			Macchine agevolatrici	Climb Cart 108 E 800-R4
			MACCHINE PER ORTICOLTURA E SERRE	
7.611	4	6.232	Trattori orticoltura ((4 h di funzion.al 50% Pmax)	STAR 3000
			Trattori orticoltura ((4 h di funzion.al 50% Pmax)	TRX 9800
38.447		40.788	Motocoltivatori	MTC 621
			Motocoltivatori	410
			Motocoltivatori	G 45
			Motozappatrici	RL 308
			Motozappatrici	MZ 2100 R
			Motozappatrici	12000

			MACCHINE PER LA NEVE	
80		78	Motoslitta	Lynx Xtrim SC 600 H.O. E-TEC

Note

- 1 Nel 2009 N.106 Sollevatori frontali <= 6.3 m e 279 unità tra 6,3 e 10 m, Nel 2010 N.116 Sollevatori frontali <= 6.3 m e 279 unità tra 6,3 e 10 m
- 2 sono stati considerati autocarri con PTT inferiore a 8.000 Kg
- 3 Abbiamo considerato che il 30% di questa produzione ricada nelle caratteristiche dei mezzi presi in considerazione.
- 4 Abbiamo considerato che il 70% di questa produzione ricada nelle caratteristiche dei mezzi presi in considerazione.

Ringraziamenti

Le informazioni sulle caratteristiche delle macchine e soprattutto sui dati commerciali degli anni 2009 e 2010 sono stati forniti dalle aziende coinvolte in questa ricerca tramite numerose telefonate e mail e dalle Associazioni di categoria che gentilmente ringraziamo.

ANFIA Torino

Tel. 011 5546526, fax 011 545464 e.mail m.saglietto@anfia Web site www.anfia.it

UNACEA Roma

Tel. 06 8555203, fax 06 8559860 e.mail lucanutarelli@unacea.org Web site www.unacea.org

UNACOMA Roma

Tel. 06 4329 81, fax 06 43298234 e.mail federica.tugnoli@unacoma.it Web site www.unacoma.it

Un particolare ringraziamento all'Ing. Fiorenzo Malaguti, Dirigente di IMAMOTER Istituto per le Macchine Agricole e Movimento Terra del CNR per la collaborazione fornita e al Dott. Gaetano Di Gioia, Presidente della Micro Vett Spa per la costante supervisione durante la preparazione della ricerca.

IMAMOTER – CNR

Via Canal Bianco 28, 44044 Cassana (FE)

Tel. 0532 735611, Fax 0532 735666 e.mail info@imamoter.cnr.it Web site www.imamoter.cnr.it

MICRO VETT SpA

Via Gambellara 34, 40026 Imola (BO)

Tel. 0542 362050, Fax 0542 362094 e.mail digioia@micro-vett.it Web site www.micro-vett.it