

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE FACOLTÀ DI INGEGNERIA

*Dottorato di Ricerca in Ingegneria dell'Informazione - XVII ciclo
Curriculum ingegneria elettronica*



METODI E STRUMENTI PER LA CARATTERIZZAZIONE E LO SVILUPPO DELLE BATTERIE AL LITIO

METHODS AND TOOLS FOR CHARACTERIZATION AND
DEVELOPMENT OF LITHIUM BATTERIES

Relatore:

PROF.ING. MASSIMO CONTI

Autore:

LUCA BUCCOLINI

.....

.....

Anno Accademico 2017-2018

Indice

1	Introduzione.....	4
2	Le batterie al litio.....	7
2.1	La corrente di batteria e il tasso di carica/scarica.....	7
2.2	L'impedenza interna delle batterie.....	8
2.3	La capacità della batteria.....	9
2.4	L'energia contenuta nelle batteria.....	10
2.5	Il ciclo di vita.....	11
2.6	Il principio di funzionamento.....	11
2.7	La connessione in serie delle celle.....	11
2.8	La connessione in parallelo delle celle.....	12
2.9	La ricarica.....	13
2.10	I vantaggi.....	13
2.11	Gli svantaggi.....	14
2.12	La ricarica delle batterie al litio.....	15
2.13	Le applicazioni.....	16
2.14	Le varianti sulla composizione chimica delle celle al litio.....	16
3	Modellazione ed analisi statistica sulle prestazioni delle batterie.....	18
3.1	Il modello elettro-termico per la cella al litio.....	20
3.1.1	L'individuazione dei valori dei parametri elettrici del modello.....	23
3.2	Il SystemC-WMS.....	30
3.3	Validazione del modello elettro-termico su una singola cella.....	31
3.4	Simulazione di un battery pack 8S6P ed analisi sugli effetti della variazione statistica dei parametri.....	34
3.5	La caratterizzazione statistica di un modulo 1S6P.....	41
4	Piattaforma per lo sviluppo di algoritmi per BMS.....	54
4.1	L'architettura della piattaforma di HW/SW.....	55
4.1.1	Il Battery Management System.....	55
4.1.2	Il caricabatterie.....	58
4.1.3	Il software di gestione e monitoraggio della piattaforma.....	58
4.2	Validazione della piattaforma.....	61
4.3	L'utilizzo della piattaforma per il confronto degli algoritmi di bilanciamento e carica.....	64
5	Conclusioni.....	74
	Bibliografia.....	76
	Elenco pubblicazioni:.....	81

1 Introduzione

Prove scientifiche hanno recentemente dimostrato che i cambiamenti climatici del 21° secolo sono legati all'attività umana. Il surriscaldamento globale è principalmente dovuto alle emissioni di CO₂ causate dalla combustione di combustibili fossili (carbone, gas naturali, petrolio, ecc.) per la produzione di energia e per il trasporto. L'incremento nell'utilizzo delle energie rinnovabili è una possibile soluzione per ridurre le emissioni dannose. Grazie a queste considerazioni la green-economy non è più un'idea ma realtà.

I primi veicoli elettrici sono stati prodotti alla fine del diciannovesimo secolo; la tecnologia elettrica è stata poi soppiantata dai veicoli a combustione interna tuttavia, alla fine del ventesimo secolo, la ricerca sui veicoli elettrici è ripresa in maniera vigorosa e nuovi tipi di veicoli elettrici sono stati proposti:

- FHEV (full hybrid electric vehicle): con un motore a combustione interna ed un motore elettrico che lavorano in parallelo, può viaggiare esclusivamente con trazione elettrica solo per brevi distanze.
- PHEV (plug-in hybrid electric vehicle): un veicolo ibrido con una grande batteria che può essere ricaricata dalla rete elettrica che consente di percorrere grandi distanze nella sola modalità elettrica.
- EREV (extended range electric vehicle): un motore a combustione interna ed un motore elettrico lavorano in serie. Si tratta di un veicolo con un motore a combustione ed un generatore che ricarica la batteria. Questo sistema consente di ottenere range più elevati rispetto al veicolo elettrico tradizionale.
- BEV (battery electric vehicle): non utilizza il motore a combustione. Il motore elettrico viene alimentato dalla sola energia presente nella batteria, ricaricata esclusivamente dalla rete elettrica.
- FCEV (fuel cell electric vehicle): il carburante, tipicamente idrogeno, viene utilizzato a bordo del veicolo tramite un insieme di fuel-cell per generare elettricità per il motore elettrico.

Diversi carburanti e soluzioni per la trazione innovativi sono stati studiati da "EUCAR/JRC/CONCAWE wells-to-wheel study [4]". Attualmente i veicoli elettrici a batteria (BEV) sono limitati dagli elevati costi iniziali, dovuti principalmente al costo delle batterie, dall'autonomia limitata e dagli elevati tempi necessari per le ricariche, nonché dal limitato numero di infrastrutture di ricarica. Per far sì che le batterie siano protagoniste nel mercato globale dovranno essere incrementate la densità energetica ed in generale l'efficienza del battery-pack.

Oltre a studi avanzati sull'elettrochimica un ruolo fondamentale viene svolto dall'integrazione delle celle elementari nel battery-pack. In più, l'impatto che avranno i veicoli elettrici sulla rete elettrica globale dovuto alla mancanza di infrastrutture adeguate alla ricarica è un problema che dovrà essere risolto [1]–[3].

Gli sforzi dei ricercatori stanno diventando sempre più prolifici e grazie alla sempre più alta densità energetica delle celle al litio, all'elevata efficienza di carica e scarica ed alle maggiori durate, le batterie al litio sono sempre più utilizzate non solo sui veicoli elettrici, ma anche in altre applicazioni come le smart-grid, come sistemi di energy-storage per impianti di energie rinnovabili.

I ricercatori, tuttavia, stanno ancora cercando di migliorare alcune performance delle batterie al litio e stanno cercando di risolvere i principali svantaggi.

La batteria è solitamente composta da diverse unità elettrochimiche fondamentali, dette celle, che possono essere connesse in serie e/o in parallelo per ottenere determinate tensioni, capacità o potenze. Fra i principali svantaggi della tecnologia c'è il fatto che il litio è un metallo molto reattivo e quindi devono essere prese delle precauzioni affinché non avvengano abusi di tipo fisico o elettrico alle celle [4]. Per questo scopo, nelle batterie è necessario introdurre dei dispositivi elettronici chiamati Battery Management Systems (BMS) [5], [6] che si occupano principalmente di [7]:

- Proteggere le celle e la batteria da danneggiamenti;
- Prolungare la vita della batteria;
- Mantenere la batteria in uno stato in cui può soddisfare i requisiti tecnici richiesti dall'applicazione in cui viene utilizzata;

Per proteggere la batteria un BMS deve monitorare costantemente la tensione e temperatura delle celle che la compongono ed attuare le dovute precauzioni come fermare la carica o scarica aprendo i teleruttori principali. La batteria è composta da svariate celle che, a causa delle tolleranze dei processi di produzione o delle differenti condizioni operative, hanno diverse prestazioni [7], [8]. Queste differenze fra le celle che compongono la batteria tendono ad essere amplificate ad ogni ciclo di carica o scarica se non vengono opportunamente gestite. L'intera batteria è limitata nelle prestazioni dalla cella con capacità inferiore. Una volta che questa cella si scarica, la carica delle altre celle diviene inutilizzabile.

Il BMS consente di superare questo limite applicando delle strategie di bilanciamento di carica fra le celle. Si parla di bilanciamento passivo quando dell'energia viene prelevata dalla cella più carica e viene dissipata tramite alcuni resistori in calore; di bilanciamento attivo quando l'energia viene prelevata da una o più celle e viene trasferita in altre utilizzando dei metodi più complessi [9]. A questo proposito diverse tecniche hardware ed algoritmi sono stati recentemente proposti dai ricercatori [10].

Un altro aspetto importante di cui si deve occupare il BMS, e su cui il mondo della ricerca si sta concentrando, è la stima dello stato di carica della batteria (SoC) [11], [12] e del suo stato di salute (SoH) [12]–[15]. Queste informazioni sono cruciali per la conoscenza della capacità residua nella batteria e per la capacità di fornire la potenza desiderata nel tempo.

I battery management system sono quindi i componenti tecnologicamente più complessi che compongono le batterie. Gli algoritmi che gestiscono le batterie (di bilanciamento e carica, di stima del SoC e dell'SoH, ecc.) inclusi nel BMS, si basano su alcuni modelli matematici delle celle al litio e devono essere prima simulati [16], [17], poi validati sui sistemi reali [18]–[20]. L'accuratezza dei modelli è fondamentale per ottenere degli algoritmi di stima affidabili per ottenere un controllo preciso della batteria. Al tempo stesso, un'accurata scelta della tecnica di bilanciamento consente di

diminuire i tempi di ricarica ed aumentare l'efficienza energetica mantenendo la temperatura del BMS entro i limiti consentiti.

In questo lavoro di tesi, dopo aver descritto le batterie al litio, viene proposto, nel capitolo 3, un nuovo modello elettrico di cella al litio che utilizza dei diodi per rappresentare i diversi comportamenti in carica ed in scarica delle celle. Unitamente al modello viene descritto anche il metodo utilizzato per l'identificazione dei valori dei parametri. Il modello, implementato con due linguaggi di simulazione differenti, Simulink e System-C (una libreria del C++), viene validato utilizzando delle misure sperimentali ottenute usando una cella al litio-ferro-fosfato da 50 Ah [16]. Grazie alle potenzialità del System-C vengono realizzate una serie di simulazioni Montecarlo per valutare l'influenza delle variazioni statistiche dei vari parametri del modello sulle prestazioni della batteria [21] [22].

Nel capitolo 4 viene proposta e descritta una piattaforma hardware/software composta da un BMS, un caricabatterie, sei celle al litio ed un PC che gestisce la strumentazione e contiene gli algoritmi da valutare. La piattaforma viene prima validata, poi utilizzata per il confronto fra due algoritmi di bilanciamento/carica proposti. I risultati evidenziano come, con l'aiuto della piattaforma, sia possibile valutare l'efficienza energetica dell'algoritmo di bilanciamento ed i tempi di ricarica [23]. La piattaforma, essendo controllata in MATLAB, può essere utilizzata per validare un algoritmo precedentemente simulato con lo stesso linguaggio di programmazione utilizzando il modello matematico della cella al litio proposto nel capitolo 3. Le misure del BMS vengono visualizzate in tempo-reale su un PC e consentono di valutare immediatamente l'efficacia degli algoritmi di stima del SoC e dell'SoH della batteria.

2 Le batterie al litio

Il termine “batteria” viene spesso impropriamente utilizzato per indicare la singola cella elementare che effettivamente compone la batteria. In realtà, il cosiddetto “pacco-batteria”, o brevemente “batteria”, è un involucro contenente diverse celle energetiche che sono le unità elettrochimiche alla base della batteria. Queste possono essere collegate elettricamente fra loro sia in serie che in parallelo per raggiungere le caratteristiche desiderate in termini di tensione, corrente massima erogabile o capacità. Le batterie al piombo utilizzate in ambito automobilistico contengono, ad esempio, sei celle elementari da 2 V connesse in serie, ottenendo una batteria da 12 V.

Un campione di cella al litio è mostrato in Figura 1 mentre un pacco-batteria è mostrato in Figura 2.



Figura 1: una cella al litio LiFePO4

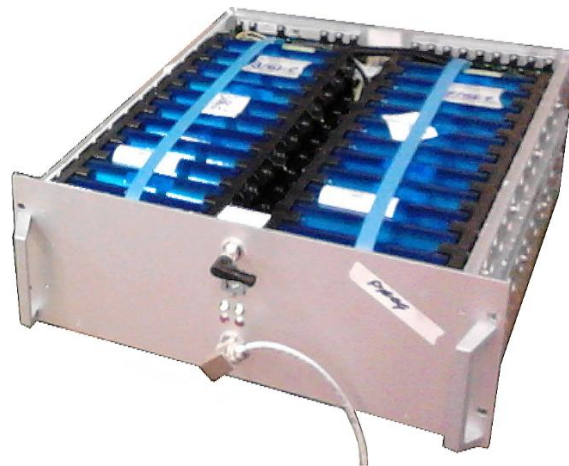


Figura 2: una batteria composta da 90 celle al litio LiFePO4

Le celle possono dividersi in celle primarie (singolo uso) o secondarie (ricaricabili) e forniscono una corrente continua mantenendo una tensione il cui valore dipende dalla composizione chimica che viene utilizzata per la sua costruzione. Tipicamente i valori di tensione delle singole celle possono oscillare da 1,2 V per le celle basate su chimiche al nickel fino ad oltre 4 V per celle al litio.

2.1 La corrente di batteria e il tasso di carica/scarica

La corrente fornita dalla batteria o dalla cella elementare, in prima analisi, dipende dal carico ed è data dalla nota legge di ohm:

$$I = \frac{E}{R} \quad (1)$$

Dove I è la corrente espressa in ampere, E è la tensione di cella o di batteria, in volt, ed R è la resistenza del carico, in ohm (figura 3).

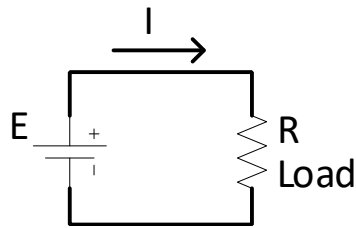


figura 3: la rappresentazione circuitale della batteria collegata ad un generico carico

Il tasso di scarica della batteria è spesso indicato con “C” e, contrariamente a quanto si possa pensare, non è la corrente massima che la batteria può fornire (che spesso è indicato come multiplo del tasso “C”) bensì è la corrente costante di carica o scarica che la batteria può supportare per un’ora, espressa in ampere. Ad esempio, una batteria da 12 V, con capacità di 20 Ah è capace di fornire una corrente costante di 20 A in un’ora o una corrente di 1 A per 20 ore. Si parla quindi di tassi di scarica di 1 C e 1/20 C. Se la batteria viene invece scaricata con un tasso di 10 C, essa si svuoterà completamente in 6 ore. Solitamente il tasso di carica è minore del tasso di scarica.

2.2 L’impedenza interna delle batterie

I composti chimici all’interno della batteria ed i conduttori utilizzati come anodo e catodo hanno una piccola resistenza interna che impediscono alla corrente di fluire liberamente all’interno della batteria. In figura 4, la resistenza interna r è rappresentata come una vera e propria resistenza fra i terminali della batteria.

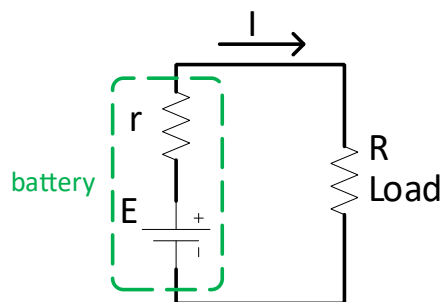


figura 4: la rappresentazione circuitale della batteria e della sua resistenza interna

Se il carico collegato alla batteria non è collegato o è trascurabile, la tensione vista ai terminali della batteria è esattamente la tensione di circuito aperto, E . Quando invece il carico connesso non è trascurabile, la corrente fornita dalla batteria al circuito è:

$$I = \frac{E}{R+r} \quad (2)$$

Dunque ci sarà della caduta di tensione ai capi della resistenza interna della batteria, pari a:

$$e = r \cdot I = r \cdot \frac{E}{R+r} \quad (3)$$

E come conseguenza porta ad avere una riduzione della tensione ai terminali della batteria, che sarà dunque:

$$(E - e) = E \cdot \left(1 - \frac{r}{R+r}\right) \quad (4)$$

Ad esempio, per una cella da $2V$ con una resistenza interna di $100\text{ m}\Omega$ collegata ad un carico di 2Ω , la tensione operativa ai capi dei terminali della batteria è di $1,9V$ e la corrente che viene fornita al carico è di $0,95\text{ A}$.

La caduta di tensione dovuta alla resistenza interna della batteria non è quindi costante, ma dipende dall'intensità della corrente fornita dalla batteria al carico. Volendo essere più precisi esistono diversi fenomeni che non possono essere modellati con una semplice resistenza interna e che devono essere trattati diversamente. In ogni caso, per diverse celle la resistenza interna si attesta attorno a pochi milliohm così gli effetti possono essere trascurati ma, per le batterie ad alta potenza, gli effetti potrebbero essere significativi causando un riscaldamento della cella dovuto all'effetto Joule ed una diminuzione della potenza disponibile.

2.3 La capacità della batteria

Come accennato la capacità della cella o della batteria è indicata in ampere-ora o milliampere-ora e rappresenta la corrente che riesce a fornire la cella (o batteria) in un'ora prima di scaricarsi o, meglio, la quantità di carica contenuta dalla cella. Spesso, quella indicata con "C" è confusa con la capacità di accumulo dell'energia senza tener conto della tensione di cella. L'intensità con la quale la carica è trasferita verso la cella o fuori dalla cella è semplicemente la corrente I .

La quantità di carica trasferita con intensità I è misurata in coulomb ed è data da:

$$Q = I \cdot t \quad (5)$$

Dove Q è la quantità di carica trasferita in coulomb e t è il tempo trascorso per il trasferimento.

La quantità di carica in una cella completamente piena è la capacità in coulomb che può essere ricavata dalla capacità C espressa in Ah moltiplicata per 3600 (il numero di secondi in un'ora), indipendentemente dalla tensione nominale della cella. Ad esempio, una cella con capacità nominale di 20 Ah contiene una carica di $20 \cdot 3600 = 72000$ coulomb.

La corrente che scorre verso il carico dipende dalla tensione della batteria che è diversa a seconda della composizione chimica delle celle che la costituiscono, come si può vedere dalla Tabella 1.

Tabella 1: la corrente fornita da celle di tipologia diversa ad un carico di 2 ohm

Battery Type	Cell Voltage (Volt)	Capacity (Ah)	Charge Capacity (Coulombs)	2 Ohm Load Current (Amps)	Discharge Time (Minutes)
Lead Acid	2	2	7,200	1	120
Nickel Cadmium	1.2	2	7,200	0.6	200
Nickel Metal Hydride	1.2	2	7,200	0.6	200
Lithium Cobalt	3.7	2	7,200	1.85	64.9
Lithium Iron Phosphate	3.2	2	7,200	1.6	75

E' da notare che nonostante le celle contengano la stessa quantità di carica, quando esse sono connesse ad un carico identico (in questo esempio 2 ohm), maggiore è la tensione di cella e maggiore è la corrente di scarica. Segue che il tempo di scarica sarà inferiore.

2.4 L'energia contenuta nelle batteria

La capacità appena descritta, che può essere espressa in coulomb o ampere-ora, non è la misura dell'energia contenuta nella batteria. L'energia contenuta nella batteria (o cella) dipende anche dalla tensione ed è espressa in watt-ora (o in Joule). Per ottenere la quantità d'energia contenuta è sufficiente moltiplicare la capacità della batteria per la tensione. Seguendo l'esempio precedente si ha che una cella da 12 V con una capacità di 20 Ah contiene un'energia paria $20 \cdot 12 = 240 Wh$.

Quando si deve scegliere una batteria il requisito principale su cui ragionare è l'energia che essa può immagazzinare altrettanto importanti sono la tensione e la corrente che può essere fornita al carico. L'energia contenuta dipende quindi, oltre che dalla quantità di carica immagazzinata, anche dalla tensione di cella che a sua volta dipende dalla composizione chimica. La Tabella 2 mostra un esempio comparativo fra diverse tipologie di celle.

Tabella 2: l'energia contenuta da celle di tipologia diversa e di uguale capacità

Battery Type	Cell Voltage (Volt)	Capacity (Ah)	WattHour Capacity (Wh)	Energy (Joules)	Charge Capacity (Coulombs)
Lead Acid	2	2	4	14,400	7,200
Nickel Cadmium	1.2	2	2.4	8,640	7,200
Nickel Metal Hydride	1.2	2	2.4	8,640	7,200
Lithium Cobalt	3.7	2	7.4	26,640	7,200
Lithium Iron Phosphate	3.2	2	6.4	23,040	7,200

Nella selezione del tipo di batteria che si vuole utilizzare, e quindi del tipo di chimica più conveniente, è necessario confrontare i prezzi in funzione dell'energia immagazzinata dalla celle piuttosto che in funzione della quantità di carica che altrimenti risulterebbe fuorviante.

Un ottimo esempio è il confronto fra batterie al litio e quelle al piombo. Il costo delle batterie al litio per quantità di carica (in Ah) è leggermente superiore a quello delle batterie al piombo. Confrontando invece i costi in funzione dell'energia immagazzinata, risulta che il costo delle batterie al litio è addirittura quattro volte superiore quello delle batteria al piombo. Purtroppo anche questa stima non tiene conto di altri fattori importanti quali, ad esempio, il ciclo di vita delle batterie.

2.5 Il ciclo di vita

Il ciclo di vita di una batteria è il numero di volte che essa può essere caricata e scaricata prima che si esaurisca. E' fortemente influenzato dal tipo di composizione chimica delle celle e dalle condizioni in cui la batteria è utilizzata.

Una batteria al piombo-acido ha una vita di 300 cicli circa mentre una batteria al litio con la stessa capacità riesce a superare i 1500 cicli prima di essere sostituita. Ad esempio, un'applicazione di lungo termine che richiede una certa capacità per ogni ciclo può essere attuata con un batteria al litio o con una serie di cinque batterie al piombo-acido (quella iniziale più le altre quattro di rimpiazzo). Si è discusso, nell'esempio precedente, che le batterie al litio hanno mediamente un costo superiore di quattro volte rispetto a quelle al piombo, a parità di energia immagazzinata. Considerando però il limitato ciclo di vita delle batterie al piombo, le batterie al litio hanno un vantaggio economico del 25% circa.

2.6 Il principio di funzionamento

La base o principio chimico-fisico di funzionamento di una batteria è una reazione di ossidoriduzione che avviene al suo interno, in cui una determinata sostanza subisce un processo di ossidazione, perdendo elettroni, mentre un'altra sostanza subisce un processo di riduzione, acquistandoli. Data la sua configurazione, la batteria consente di intercettare e sfruttare il flusso di elettroni tra le due sostanze. Tale flusso genera dunque una corrente elettrica continua, il cui potenziale elettrico è funzione delle reazioni di ossidazione e riduzione che vi avvengono. Una batteria si scarica quando queste reazioni chimiche raggiungono lo stato di equilibrio[24].

2.7 La connessione in serie delle celle

Quando una batteria è costituita da un gruppo di celle connesse in serie, la tensione è la somma delle tensioni delle singole celle, ma la capacità in termini di corrente è la stessa in quanto un'unica corrente attraversa tutte le celle.

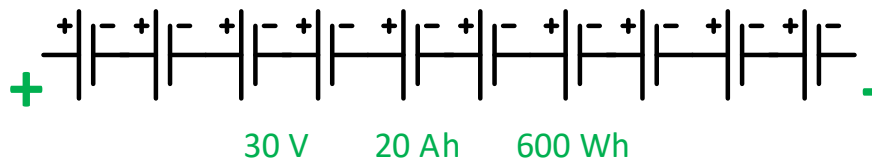


Figura 5: una batteria composta da 10 celle connesse in serie

Così, un insieme di 10 celle da 3 V e 20 Ah di capacità costituiranno una batteria con una tensione di 30 V ed una capacità di 20 Ah. L'energia immagazzinata sarà pari a 600 Wh e la potenza che riuscirà a fornire sarà di 600 W utilizzando una scarica ad 1C.

2.8 La connessione in parallelo delle celle

Quando le stesse 10 celle vengono connesse in parallelo, la tensione della batteria è la stessa di quella della singola cella, ma la capacità sarà la somma delle capacità delle singole celle poiché la corrente che interessa un eventuale carico è la somma delle correnti di ogni singola cella.

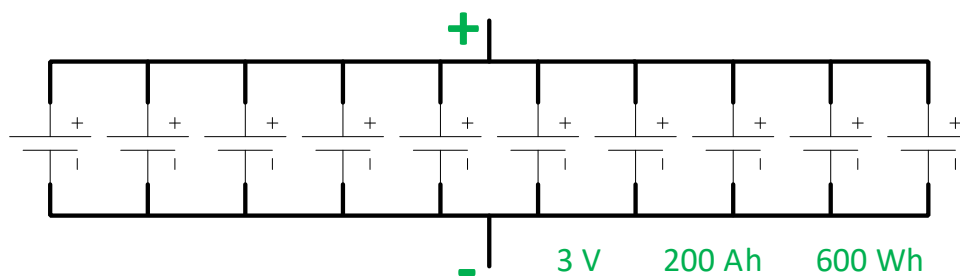


Figura 6: una batteria composta da 10 celle connesse in parallelo

La batteria dunque avrà una tensione di 3 V ed una capacità di 200 Ah. L'energia immagazzinata sarà la stessa della connessione in serie (600 Wh), così come la potenza erogabile con corrente di scarica pari ad 1C (600 W).

Da un diverso punto di vista, ogni cella ha una capacità energetica di 60 Wh. Le 10 celle degli esempi riusciranno quindi ad immagazzinare un'energia di 600 Wh, indipendentemente da come sono connesse. Allo stesso modo, riusciranno ad erogare una potenza massima di 600 W con la scarica ad 1C.

Riassumendo, una configurazione in serie comporta un'alta tensione ma una bassa corrente di batteria, i ruoli sono scambiati nella configurazione in parallelo.

La possibilità di poter connettere le celle sia in serie che parallelo, ad esempio unendo le due configurazioni, permette di assemblare batterie con capacità e tensioni le più disparate. Attenzione però. Le celle che possono essere assemblate in una batteria devono essere simili sia come stato

d'invecchiamento (SoH), dimensioni, tensioni, composizioni chimiche, capacità, forma, sia devono provenire dallo stesso costruttore.

Mischiare tipi di celle diverse all'interno della stessa batteria può portare alcune celle ad essere sovraccaricate comportando un deterioramento veloce della batteria o situazioni estremamente pericolose (esalazione di gas nocivi, incendi, esplosioni, ecc.). In maniera simile si avranno problemi in caso di sottoscariche.

2.9 La ricarica

I metodi per la ricarica delle batterie sono specifici del tipo di chimica utilizzata. Ciò significa che, oltre a dover utilizzare certe tensioni e correnti, i profili di ricarica devono essere in sintonia col tipo di composizione chimica su cui si basa la cella altrimenti le batterie potrebbero danneggiarsi.

Il litio è uno dei metalli più leggeri ed ha un potenziale elettrochimico elevato il che lo rende uno degli elementi più reattivi. Queste proprietà del litio consentono di poter ottenere delle batterie ad alta densità di energia e di potenza, utilizzabili in contesti "automotive" .

Negli ultimi anni sono state apportate diverse varianti alla tecnologia chimica di base con lo scopo di ottimizzare le celle ed adattare a specifiche applicazioni. Il litio reagisce molto violentemente quando viene posto a contatto con acqua fino a provocare un'autocombustione. I primi modelli di celle con catodi di litio metallico erano considerati poco sicuri in certe applicazioni, così i nuovi modelli non utilizzano più litio allo stato metallico ma questo viene combinato con altri elementi in maniera che esso non possa reagire in maniera così violenta.

Oggi, la tipica cella al litio usa il carbonio come materiale anodico e il biossido di litio-cobalto o un composto di litio-manganese come catodo. L'elettrolita è generalmente basato su un sale di litio in un solvente organico.

Sebbene la tecnologia al litio fosse piuttosto costosa appena fu introdotta, oggi, gli elevati volumi di produzione, hanno fatto crollare il prezzo anche oltre le previsioni.

2.10 I vantaggi

In molti casi il litio è la base chimica perfetta per gli accumulatori, anche perché esistono molte varianti su questa tecnologia. La batteria al litio di base ricaricabile fu introdotta negli anni '70 ed oggi sono utilizzate in elevati volumi in applicazioni "low-power" come in smartphone, notebook, fotocamere, ecc. Esse hanno molti vantaggi prestazionali che le rendono ideali anche per applicazioni "high-power" quali utilizzi in ambito "automotive" e "stand-by". I principali sono elencati di seguito:

- Una tensione di cella elevata (tipicamente 3,2 V e 3,7 V) significa avere un minor numero di celle, minor numero di interconnessioni ed elettronica di gestione per le batterie ad alta tensione (una cella al litio può sostituire fino a tre celle al NiCd o NiMH).
- L'assenza di un elettrolita liquido comporta una quasi totale assenza di perdite.
- Alta densità volumetrica ed i peso d'energia (ad esempio quattro volte migliore rispetto le batterie al piombo-acido).

- Alta densità di potenza.
- Capacità di realizzare batterie molto piccole. Possono ad esempio essere sviluppate su un substrato di ceramica o su uno flessibile ottenendo le batterie a film sottile [25].
- Basso peso.
- Possono essere ottimizzate per aumentare la capacità o per corrente massima.
- Sono disponibili celle fino a 1000 Ah.
- Possono essere scaricate con correnti di “40 C”. Ciò significa che, nel settore “automotive”, le alte intensità di corrente richieste possono essere soddisfatte con batterie di capacità limitata.
- Possono essere ricaricate molto velocemente.
- Supportano una scarica più profonda rispetto ad altre batterie, mantenendo circa le stesse prestazioni. Possono fornire la massima potenza fino ad una profondità di scarica (DOD) dell’80% contro un DOD del 50% delle batterie al piombo, essendo la tensione di cella quasi costante fino all’80% della curva di scarica. In altre parole, una grossa porzione dell’energia accumulata è utilizzabile, al contrario delle altre batterie.
- Tasso di auto-scarica molto basso. Possono mantenere la carica fino a dieci anni.
- Efficienza molto alta (rapporto fra quantità di carica estratta e quantità di carica caricata) del 95% o più. Poca carica elettrica viene persa durante i cicli di carica/scarica.
- Non esiste l’effetto “memoria” quindi non c’è la necessità di ricondizionare l’elemento.
- I micro-cicli di carica/scarica sono tollerati.
- Cicli di vita delle celle molto lunghi (tra 1000 e 3000 cicli). Inoltre, possono essere estesi ulteriormente utilizzando dell’elettronica di protezione per limitare il DOD della batteria.
- Le varianti del composto chimico utilizzato come base per la cella permettono di adattare le performance all’applicazione specifica.
- Le celle sono disponibili nelle più svariate forme e dimensioni, da oltre 100 produttori mondiali.
- Versatili ed altamente scalabili. Possono essere adattate per qualsiasi requisito di tensione, potenza ed energia richiesti con capacità di accumulo di carica, energia e potenza erogabili molto elevate.
- Hanno dei tempi di risposta alla carica e alla scarica molto rapidi.

2.11 Gli svantaggi

Per applicazioni ad alta potenza che richiedono un alto costo iniziale per le batterie, il sovrapprezzo per la tecnologia al litio in confronto alle batterie al piombo ha impedito un’approvazione globale della tecnologia, almeno inizialmente. Questo, a sua volta, ha scoraggiato i grossi investimenti

mantenendo limitati i volumi di produzione e quindi alto il prezzo della tecnologia. Negli ultimi anni questo processo è stato invertito ed anche per applicazioni ad alta potenza, il litio, sta divenendo molto vantaggioso.

La stabilità delle celle al litio è stata un grosso problema in passato. Poiché il litio è chimicamente più reattivo di altri elementi, sono state prese alcune precauzioni per mantenere la cella in una zona di lavoro “sicura” e prevenire inconvenienti di tipo elettrico. Le moderne celle ai polimeri di litio che hanno un elettrolita solido superano questo tipo di problemi.

Sebbene molti svantaggi delle celle al litio siano stati superati, sussistono ancora alcuni difetti, fra i quali:

- Resistenza interna moderatamente alta (più alta delle equivalenti celle NiCd);
- Regole molto restrittive per il trasporto;
- Perdita di capacità o surriscaldamento quanto una cella viene sovraccaricata;
- Degradazione della celle quando viene scaricata al di sotto di 2 V;
- Possibili forature ed instabilità termica se le celle vengono schiacciate;
- Necessità di circuiteria elettronica di controllo (BMS) ;
- La misura dello stato di carica (SoC) della cella è molto più complesso che in celle di diversa tecnologia. Il SoC è solitamente estrapolato da una semplice misura della tensione, ma la caratteristica $V(\text{SoC})$ è piuttosto piatta nella zona centrale, così sono state sviluppate tecniche alternative ma piuttosto complesse come il “Coulomb counting” ;
- Sebbene le celle al litio siano state usate da diverso tempo per applicazioni a bassa potenza, non vi sono dati riguardo le prestazioni a lungo termine su celle per applicazioni “high-power, tuttavia le predizioni di affidabilità su alcuni test accelerati dimostrano che il ciclo vitale della cella al litio è generalmente superiore a quello di altre tecnologie tuttora in uso;

Questi svantaggi sono sicuramente sormontati dagli innumerevoli vantaggi apportati da questa tecnologia, così, complice l’abbassamento dei prezzi, la tecnologia al litio è considerata impareggiabile per i prossimi anni.

2.12 La ricarica delle batterie al litio

Le batterie al litio debbono essere ricaricate regolarmente. La tensione di ricarica è tipicamente legata alla chimica delle celle. La carica della batteria al litio è un aspetto complesso in quanto una sovraccarica non sarebbe tollerata dalla cella, così come una sotto-scarica.

Il metodo di carica preferenziale è il CC-CV, ossia la cella viene caricata per un certo periodo a corrente costante poi, raggiunta una certa tensione di cella, la carica continua usando una tensione costante.

I caricatori veloci tipicamente operano durante la fase a corrente costante, ossia quando la corrente di carica è massima. Si spengono quando dovrebbero iniziare la fase a tensione costante, riducendo la corrente di carica. Questo punto coincide con un livello di carica del 70% circa della cella.

La carica immagazzinata dalla batteria è maggiore quando la batteria viene ricaricata parzialmente piuttosto che quando la batteria è ricaricata per intero.

2.13 Le applicazioni

Le celle al litio ricaricabili sono da diversi anni utilizzate in gran parte dei prodotti della fascia “consumer”. Negli ultimi anni, le versioni ad alta potenza delle celle (fino a 1000 Ah) hanno fatto la loro comparsa sul mercato e sono disponibili per l’utilizzo in applicazioni come la trazione elettrica (EV, HEV), in applicazioni “stand-by” dove viene creato un sistema d’immagazzinamento energetico di supporto, utile qualora la fonte energetica primaria venisse a mancare. Un’ultima applicazione che si sta fortemente sviluppando è quella in ambiente “smart grid”, dove la batteria al litio viene utilizzata come accumulatore per l’energia prodotta da fonti energetiche rinnovabili.

2.14 Le varianti sulla composizione chimica delle celle al litio

Le proprietà uniche del litio sono state usate come base dei numerosi composti chimici sia per le batterie primarie che per le batterie secondarie. L’utilizzo, per gli elettrodi, dei nano-materiali, consente di avere una superficie attiva molto grande e quindi un’elevata capacità di trasportare corrente. Questa tecnologia consente di avere intensità di corrente pari a 10 C o più, permettendo l’utilizzo delle celle sui veicoli elettrici.

Le principali composizioni chimiche delle celle basate sul litio tuttora in commercio sono elencate di seguito.

- Ioni di litio;
- Litio-Polimeri;
- Altre varianti basate sul catodo al litio;
- Litio-Cobalto LiCoO_2 ;
- Litio-Manganese LiMn_2O_4 ;
- Litio-Nickel LiNiO_2 ;
- Litio-Nickel-Cobalto-Manganese (NCM) $\text{Li}(\text{NiCoMn})\text{O}_2$;
- Litio-Nickel-Cobalto-Alluminio (NCA) $\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$;
- Litio-Ferro-Fosfato LiFePO_4 ;
- Litio-Metallico-Polimeri;
- Litio-Zolfo Li_2S_2 ;
- Altre varianti con anodi a tecnologie differenti (Litio-Titanato, LTO) ;
- Litio-aria;

In tabella vengono mostrate le caratteristiche principali delle celle basate sulle tecnologie più diffuse:

Tabella 3: i tipi di cella più diffusi e le loro caratteristiche

Cathode Material	Typical Voltage (V)	Energy Density		Thermal Stability
		Gravimetric (Wh/Kg)	Volumetric (Wh/L)	
Cobalt Oxide	3.7	195	560	Poor
Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA)	3.6	220	600	Fair
Nickel Cobalt Manganese Oxide (NCM)	3.6	205	580	Fair
Manganese Oxide (Spinel)	3.9	150	420	Good
Iron Phosphate (LFP)	3.2	90-130	333	Very Good

3 Modellazione ed analisi statistica sulle prestazioni delle batterie

Un aspetto fondamentale su cui i progettisti stanno concentrando gli sforzi è l'aumento della capacità utilizzabile e l'aumento della durata nel tempo delle batterie al litio. Per raggiungere tali obiettivi è fondamentale l'utilizzo di un modello che descrive accuratamente la batteria. Per una buona progettazione degli algoritmi di controllo per batterie al litio è indispensabile avere una stima accurata dello stato di carica e della vita residua della batteria.

Un modello elettrico utilizzato in letteratura per la cella al litio è basato sulla connessione in serie di un generatore di tensione ed un resistore, come introdotto nel paragrafo 2.2: il generatore produce la tensione di circuito aperto mentre la resistenza tiene conto della riduzione/aumento di tensione che si ha quando un carico o un caricabatterie è collegato con la cella. Questo modello, tuttavia, ha il grosso limite di non tener conto delle dinamiche del sistema. In modelli più accurati, invece, sono stati aggiunti uno o più rami R-C in serie per tener conto anche dei comportamenti ai transienti [26]–[35] dovuti a fenomeni di rilassamento interni della batteria. Nei modelli più accurati, i parametri del circuito elettrico equivalente dipendono sia dal SoC che dalla temperatura. La scelta del modello da utilizzare per l'applicazione specifica dovrà essere frutto di un compromesso fra accuratezza e velocità di simulazione.

Un aspetto importante da valutare è la scelta della procedura e dell'algoritmo utilizzati per catturare le performance della cella, come i valori dei parametri rappresentati dalla resistenza interna, capacità e costanti di tempo. Solitamente sono utilizzate due differenti categorie di misure e relative procedure di estrazione dei parametri:

- La misura statica della capacità della cella in ampere-ora a corrente di scarica costante.
- Il test “hybrid pulse power characterization” (HPPC) [36] che utilizza una sequenza di impulsi di carica e scarica per caratterizzare la risposta in tensione della cella a vari livelli di SoC ed a varie intensità di corrente.

Le prestazioni delle batterie al litio dipendono fortemente dalle temperature operative. La potenza che riesce a fornire la cella al litio si riduce significativamente per temperature al di sopra dei 50°C e la capacità utilizzabile diminuisce al di sotto del -10°C. Anche il SoC e la resistenza interna dipendono dalla temperatura. La modellazione della dinamica della temperatura è quindi fondamentale per l'analisi delle prestazioni della batteria. In diversi articoli scientifici un modello termico è stato aggiunto al modello elettrico della cella al litio [5], [27], [32], [33].

In diverse applicazioni ad alta potenza, come nel settore automotive, la tensione da dover fornire al carico e la corrente sono alte per cui le batterie sono composte tipicamente da una combinazione di celle connesse in serie ed in parallelo. A causa delle tolleranze dei processi produttivi le celle sono differenti le une dalle altre e durante la carica non raggiungono la piena carica allo stesso istante. Le variazioni della capacità, del SoC, dell'OCV, della resistenza interna e delle costanti di tempo così come dei parametri del modello termico possono essere molto alte ed influenzare pesantemente le performance delle batterie [5].

Inoltre, la temperatura differente all'interno della batteria enfatizza le non-uniformità fra le celle che la compongono. Alcuni BMS, fra gli altri compiti, utilizzano strategie di gestione termica in modo da monitorare la temperatura media della batteria inducendo, ad esempio, il raffreddamento forzato.

Il BMS protegge la batteria dai danneggiamenti e cerca di mantenerla entro i limiti operativi. Si occupa della stima del SoC e della stima dell'SoH. La vita della batteria e le prestazioni dipendono principalmente dai profili di carica e di scarica, dalle condizioni termiche, dalle scariche profonde e dall'ampiezza degli impulsi di corrente durante le cariche.

Un'analisi dei BMS è stata presentata in [5] con diversi approfondimenti riguardo le misurazioni delle tensioni delle celle, la stima dello stato della batteria e l'equalizzazione delle celle.

Per sviluppare ed ottimizzare gli algoritmi del BMS è fondamentale avere un modello elettro-termico accurato che caratterizza la singola cella al litio per ottenere quindi un modello che rappresenta statisticamente la variabilità fra le celle che compongono la batteria.

Il letteratura sono state presentati una grande quantità di modelli di simulazione di BMS [26]–[30], [37]–[39]. Gli ambienti di simulazione più utilizzati sono sicuramente MATLAB e Simulink [27]–[30], [35]. Tuttavia questi ambienti si integrano difficilmente se si vuole analizzare il BMS a livello di sistema. Un esempio potrebbe essere l'integrazione con un sistema di monitoraggio da parte dell'utente o del produttore per il monitoraggio dello stato della batteria [40] oppure l'integrazione con una stazione di ricarica [1], [3] o l'integrazione con la smart-grid.

System-C è un linguaggio di progettazione consolidato e basato sul C++ ed è utilizzato principalmente per descrizioni di sistemi elettronici a livello di sistema. E' particolarmente adatto per la progettazione ed ottimizzazione di sistemi hardware/software dalla sintesi ad alto livello fino alla progettazione a livello di trasferimento tra registri (RTL). Ad esempio, è stato utilizzato per la modellazione di battery management system in [17], [41].

Le novità introdotte con questo lavoro riguardano la definizione di un modello elettro-termico a parametri concentrati per la singola cella al litio utilizzando dei diodi per modellare i differenti comportamenti in carica ed in scarica e la definizione della procedura di estrazione dei parametri del modello della cella partendo da misure sperimentali. Infine si è proposto un ambiente di simulazione in System-C WMS per la simulazione di una batteria composta da più celle.

Il modello presentato e l'ambiente di simulazione sono stati utilizzati per la caratterizzazione di una cella al litio ferro fosfato (LFP) con capacità nominale di 50 Ah. L'ambiente in System-C WMS ha permesso la definizione e simulazione di una batteria composta da 48 celle connesse in serie ed in parallelo, considerando delle variazioni statistiche della capacità nominale, del SoC e dei parametri delle singole celle. L'ambiente di simulazione può essere utilizzato per la simulazione statistica di un pacco batteria e per analizzare gli effetti dei diversi algoritmi di bilanciamento del BMS sulle prestazioni della batteria.

3.1 Il modello elettro-termico per la cella al litio

Il modello elettrico equivalente per una cella al litio comunemente utilizzato in letteratura [16], [26], [27], [29]–[35] è composto da un generatore di tensione con in serie una resistenza ed alcuni rami R-C in parallelo. La parte elettrica del modello è raffigurata in Figura 7a.

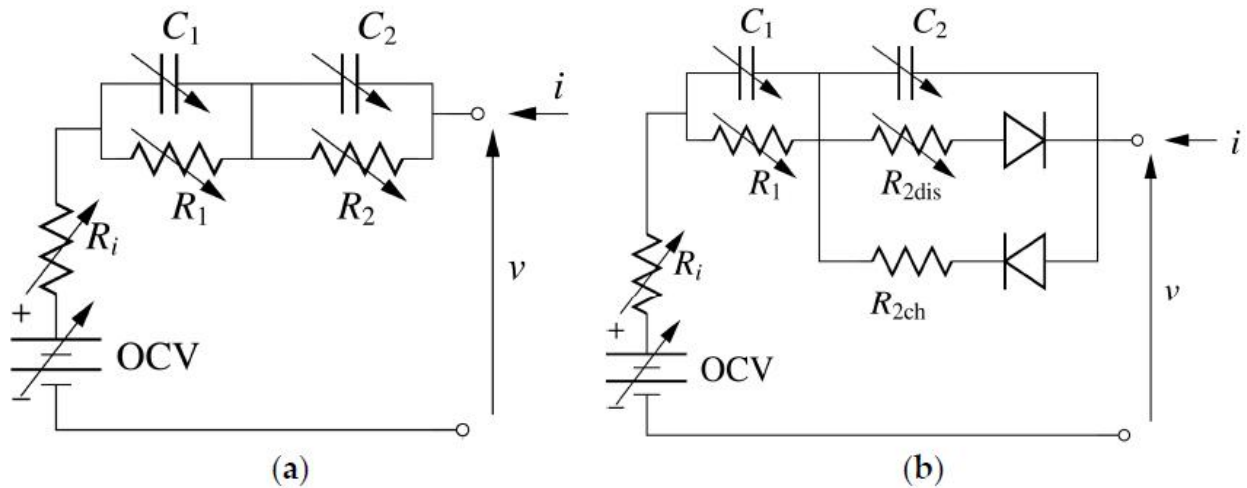


Figura 7: Schema del modello elettrico della cella al litio: (a) modello classico e (b) modello modificato. OCV è il valore di un generatore di tensione ideale che rappresenta la tensione di circuito aperto della cella.

Il circuito può essere descritto dalle seguenti relazioni:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = \frac{i}{C_1} - \frac{v_1}{R_1 C_1} \\ \dot{v}_2 = \frac{i}{C_2} - \frac{v_2}{R_2 C_2} \end{cases} \quad (6)$$

$$v = iR_i + v_1 + v_2 + OCV$$

Dove v_1 e v_2 sono le variabili di stato, v ed i sono le variabili delle porte dei bipoli, e OCV è un generatore di tensione ideale che rappresenta la tensione di circuito aperto di ogni cella.

I parametri del modello sono: la resistenza interna R_i , le due resistenze R_1, R_2 e le due capacità C_1, C_2 dove gli ultimi quattro parametri identificano la risposta ai transienti della cella. $OCV, R_i, R_1, R_2, C_1, C_2$ hanno una dipendenza dalla temperatura T e dallo stato di carica SoC della cella come descritto in [42]–[45]; tale dipendenza è stata modellata utilizzando delle funzioni bidimensionali lineari a tratti dove i coefficienti sono stati ottenuti utilizzando delle procedure di caratterizzazione riportate nel prossimo paragrafo. Lo stato di carica della cella è descritto dalla seguente relazione:

$$SoC = (SoC_{init} - \frac{1}{Q_{nom}} \int_0^t i(\tau) d\tau) \quad (7)$$

dove Q_{nom} è la capacità nominale della cella e SoC_{init} è lo stato di carica iniziale della cella.

Grazie al comportamento non simmetrico della cella durante la carica e la scarica notato durante le misure sperimentali descritte nel paragrafo 3.1.1 ed evidenziate in [26], [28], il modello di Figura 7a è stato modificato come mostrato in Figura 7b, considerando differenti valori per R_2 durante le fasi di carica e scarica R_{2ch} e R_{2dis} . In particolare il valore di R_{2ch} è costante e trascurabile rispetto ad R_1 e ciò porta ad avere un transiente di carica $R_{2ch}C_2$ molto più veloce rispetto al transiente dato da R_1C_1 . In [26] e [28], il diverso comportamento che è stato notato durante le fasi di carica e scarica della cella è stato modellato utilizzando una polarizzazione o un modello con isteresi applicato all'OCV. Il modello presentato con questa tesi, rappresentato in Figura 7b ha il vantaggio di essere molto più semplice.

Anche dal punto di vista termico, per modellare il comportamento termico della singola cella, è stato utilizzato un modello a parametri concentrati. Il modello è stato ottenuto utilizzando il bilancio energetico tra il riscaldamento per effetto joule e la conduzione termica e viene descritto in dettaglio dalle seguenti relazioni:

$$G_{in}(T_{in} - T_{ext}) + C \frac{dT_{in}}{dt} = R_{th} i^2 \quad (8)$$

$$G_{in}(T_{in} - T_{ext}) = G_{conv}(T_{ext} - T_{amb}) \quad (9)$$

dove T_{in} è la temperatura interna della cella, T_{ext} è la temperatura sulla superficie esterna della cella e, T_{amb} è la temperatura ambiente, C è la capacità termica interna della cella, $G_{in} = kA/L$ è la conducibilità termica interna, k è la conducibilità termica, L è la lunghezza lungo cui viene calcolata la conduzione termica, $G_{conv} = hA$ tiene conto del trasferimento di calore convettivo, h è il coefficiente di trasferimento termico convettivo, A è l'area attraverso la quale viene calcolata la convezione ed $R_{th}i^2$ è il flusso di calore generato internamente dalla cella.

La generazione di calore interna della batteria è dominata dall'effetto Joule sulla resistenza interna della cella per cui questo termine è proporzionale al quadrato della corrente erogata o assorbita. In particolare, la generazione del flusso di calore è rappresentata dal termine $R_{th}i^2$, dove R_{th} è la somma delle resistenze interne R_i , R_1 ed R_2 .

In questa tesi si assume che la temperatura interna della cella sia uniforme e che la generazione di calore sia distribuita in maniera uniforme all'interno del volume della cella. Si assume che i soli fenomeni responsabili del trasferimento di calore fra la cella e l'ambiente esterno siano la conduzione e la convezione. Per la modellazione della singola cella, la resistenza termica è trascurabile rispetto R_{in} ed R_{conv} e non è riportata nelle equazioni 8 e 9 dove il flusso di calore trasferito mediante conduzione termica è uguale al a quello assorbito per convezione.

La resistenza termica del contenitore della cella sarà introdotta nella simulazione del battery pack per modellare lo scambio termico fra celle adiacenti, quindi, l'equazione 9 verrà modificata opportunamente. Nella Tabella 4 vengono riportati i coefficienti termici ed i parametri geometrici utilizzati per la simulazione delle singole celle, come descritto nel paragrafo 5. In Figura 8 viene rappresentata la geometria della cella al litio considerata con il modello del circuito elettro-termico descritto dalle equazioni 8 e 9 mentre in Figura 9 viene confrontato lo schema elettrico del modello e lo schema a blocchi dell'ambiente di simulazione utilizzato (SystemC-WMS), descritto nel paragrafo 3.2.

Tabella 4: parametri fisici e termici della cella

Massa M	1,4 kg
Dimensioni della cella L, W, H	(37, 101, 192) mm
Conducibilità termica k_i [16]	1,11 $\frac{W}{mK}$
Capacità termica specifica c_p [17]	830 $\frac{J}{kgK}$
Resistenza termica interna $R_{in} = \frac{L}{k_i A}$	1,735 $\frac{K}{W}$
Capacità termica interna $C = c_p M$	1162 $\frac{J}{W}$
Coefficiente di trasferimento termico convettivo h [2]	38,953 $\frac{W}{m^2K}$

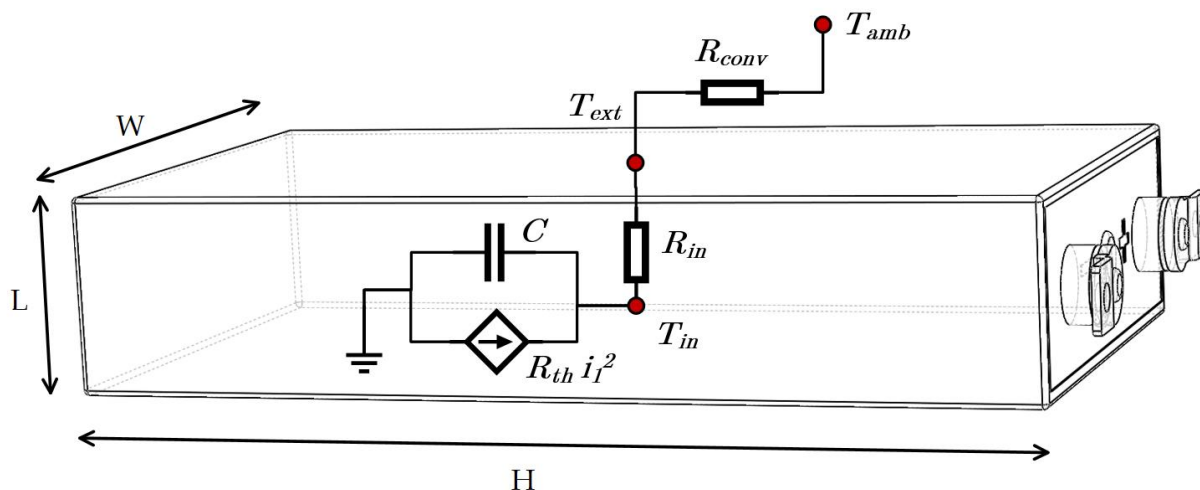


Figura 8: rappresentazione geometrica e termica della singola cella

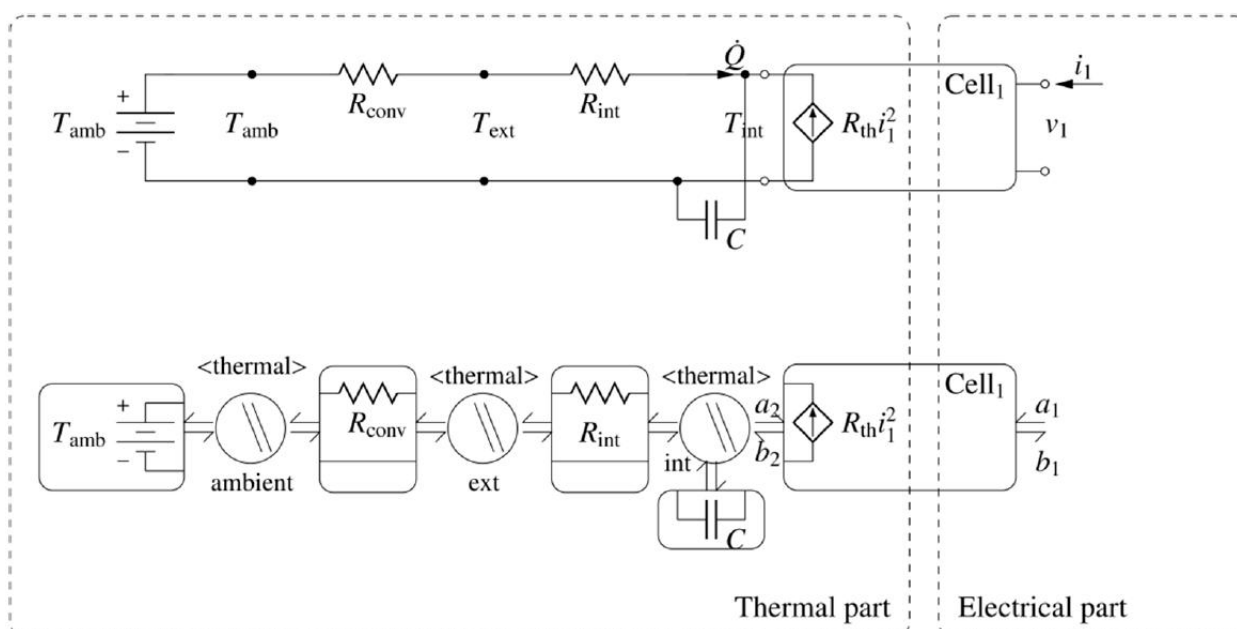


Figura 9: rappresentazione circuitale termica della singola cella (in alto) e relativa implementazione in System-C (in basso)

3.1.1 L'individuazione dei valori dei parametri elettrici del modello

Esistono diverse tecniche per la stima del valore dei parametri del modello. La più conosciuta è l'hybrid pulse power characterization (HPPC) [27][30][31] dove la cella viene sottoposta a diversi impulsi di carica e scarica. L'algoritmo utilizzato per l'estrazione dei parametri del modello è basato sulla procedura HPPC ed opera come segue: partendo con una batteria a piena carica (SoC = 100%), questa viene sottoposta ad una corrente di scarica per il tempo necessario affinché il SoC si decrementi del 10%. Di seguito la cella viene fatta rilassare per un tempo sufficiente in modo da ripristinare il livello di OCV. La procedura descritta viene ripetuta finché il SoC della cella raggiunge il 10%. Infine la cella viene ricaricata fino a raggiungere il SoC = 100% con una corrente

costante. La forma della corrente utilizzata nella procedura è mostrata in Figura 10 in alto mentre in basso viene riportata la tensione ai capi della cella. Alcuni dettagli riguardo le fasi di carica e scarica sono mostrate al lato destro dell'immagine.

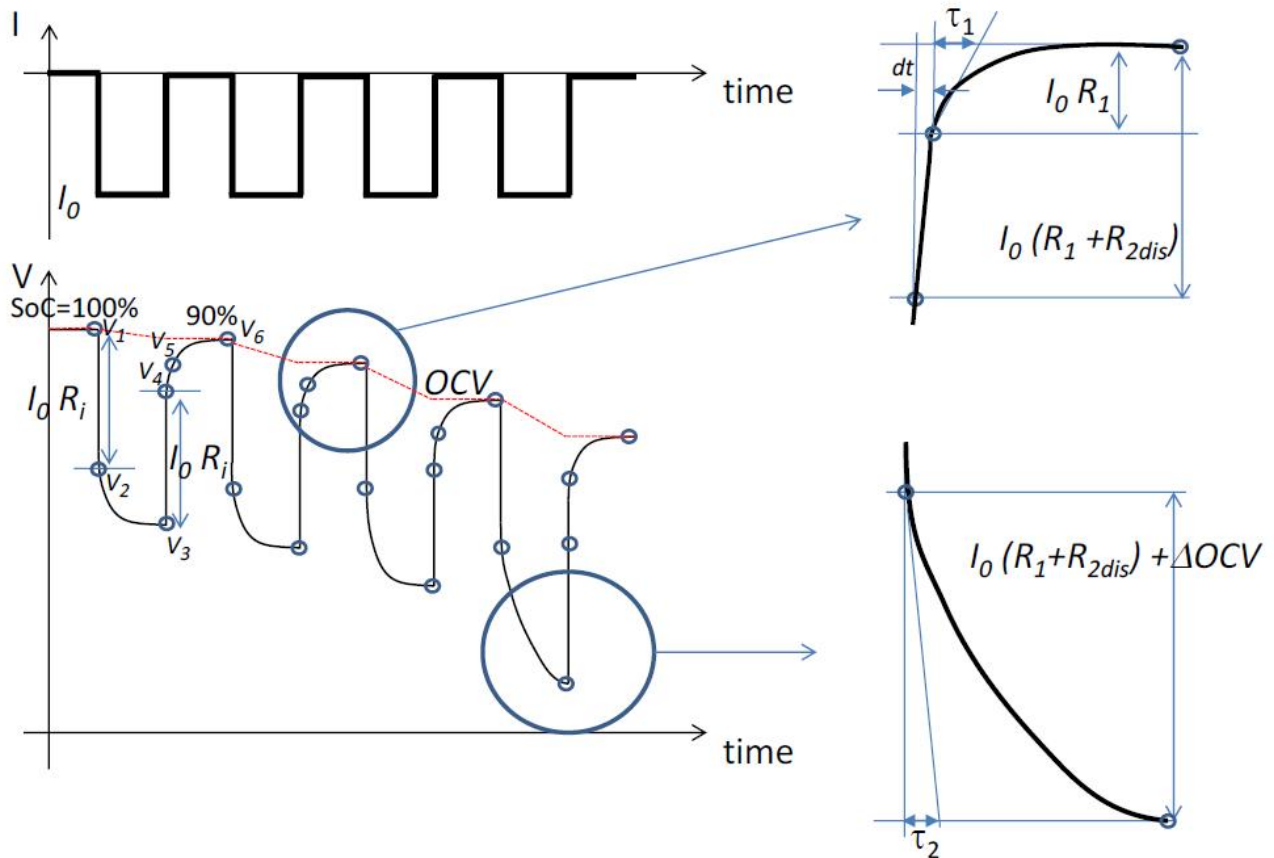


Figura 10: dettagli sulla procedura di estrazione dei parametri

In particolare, in Figura 10, sono stati evidenziati i valori di tensione nello stato stazionario della cella V_1 , V_3 e V_6 . Con V_2 e V_4 sono stati indicati i valori di tensione ai capi della cella misurati ad un campione di distanza dal fronte di discesa o salita dell'impulso di corrente applicato. Infine V_5 è il valore della tensione di cella misurato ad un intervallo di tempo dT limitato in seguito al fronte di salita dell'impulso di corrente di scarica.

In prima analisi è stato misurato il valore di tensione di circuito aperto della cella (OCV) negli stati stazionari misurati negli istanti di riposo ($I=0$ A). Si sono quindi ottenuti i valori di OCV per SoC = 100%, 90%, 80%, ..., 10%:

$$\begin{aligned}
 OCV(\text{SoC}=100\%) &= V_1; \\
 OCV(\text{SoC}=90\%) &= V_6; \\
 &\dots
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Un impulso di corrente prelevata dalla cella provoca una caduta di tensione immediata ai capi della resistenza R_i per cui il suo valore viene stimato tramite le seguenti equazioni:

$$R_i(\text{SoC}=100\%) = \frac{V_1 - V_2}{I_0} \quad (11)$$

$$R_i(\text{SoC}=90\%) = \frac{V_4 - V_3}{I_0} \quad (12)$$

In maniera simile sono ottenuti gli altri valori di R_i per $\text{SoC} = 80\%, 70\%, \dots, 10\%$.

I valori degli altri parametri del modello, R_1, C_1, R_2, C_2 non sono semplici da stimare. Tuttavia, ragionando con le costanti di tempo dei due rami RC si può porre $\tau_2 = R_2 C_2$ molto minore di $\tau_1 = R_1 C_1$ per cui il primo breve transiente è dovuto alla scarica di C_2 ed il rimanente è dato dalla scarica di C_1 . Quindi, considerando che la seconda parte del transiente è dovuto al prodotto $R_1 C_1$, si può utilizzare la seguente equazione per stimare i valori di R_1 e di C_1 :

$$R_1(\text{SoC}=90\%) = \frac{(V_6 - V_5)}{I_0} \quad (13)$$

$$\tau_1(\text{SoC}=90\%) = \frac{(V_6 - V_5)}{\left. \frac{dV}{dt} \right|_{V_5}} \quad (14)$$

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \quad (15)$$

In maniera simile, i valori di R_2 e C_2 possono essere stimati considerando la prima parte del transiente durante la scarica:

$$R_{2dis}(\text{SoC}=90\%) = \frac{(V_2 - V_3) - \Delta OCV}{I_0} - R_1 \quad (16)$$

$$\tau_2(\text{SoC}=90\%) = \frac{(V_3 - V_2)}{\left. \frac{dV}{dt} \right|_{V_2}} \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{\tau_2}{R_2} \quad (18)$$

dove

$$\Delta OCV(\text{SoC}=90\%) = OCV(\text{SoC}=100\%) - OCV(\text{SoC}=90\%) \quad (19)$$

La stima dei parametri descritta tramite le equazioni (10)-(19) ed in Figura 10 è stata eseguita mantenendo la cella in una camera climatica con temperature costanti rispettivamente a 0°C, 25°C e 40°C. Così facendo si sono ottenuti i valori dei parametri $OCV, R_i, R_1, C_1, R_{2dis}, C_2$ per i differenti valori di temperatura indicati e differenti valori di SoC (dal 10% al 100% a step di 10%). Come passo successivo, partendo dai valori ottenuti, sono state ricavate delle funzioni bidimensionali lineari a tratti cercando di minimizzare l'errore fra il modello e le misure sperimentali.

La procedura di estrazione dei parametri descritta è stata applicata ad una cella al litio con chimica al litio-ferro-fosfato (LiFePO₄). La tensione nominale della cella è 3,2 V mentre la capacità è 50 Ah. Le dimensioni sono 37 x 101 x 192 mm³ e le tensioni limite di carica e scarica sono rispettivamente 2,5 V e 3,8 V. Il profilo di test è stato modificato rispetto al classico HPPC ed è raffigurato in Figura 11. Inizialmente la cella viene scaricata con una corrente costante di 25 A per 720 s che corrisponde ad una capacità di $25 \text{ A} \times 720 \text{ s} \times 1 \text{ h} / 3600 \text{ s} = 5 \text{ Ah}$, ossia il 10% della capacità nominale della cella.

Dopo un periodo di riposo ($I = 0 \text{ A}$) di 300 s, vengono applicati due impulsi consecutivi di scarica e carica di 25 A seguiti da un ulteriore periodo di riposo di 300 s e da due ulteriori impulsi di scarica e carica a corrente di 75 A. Vengono utilizzati tali impulsi per verificare l'indipendenza di R_i dal valore della corrente applicata. Poiché gli impulsi sono simmetrici in carica ed in scarica questi non vanno a modificare il SoC della cella. Il ciclo descritto viene così ripetuto per nove volte finché il SoC della cella non raggiunge il 10 % della capacità nominale. Infine la cella viene ricaricata con una corrente di 50 A costante fino alla completa ricarica della batteria.

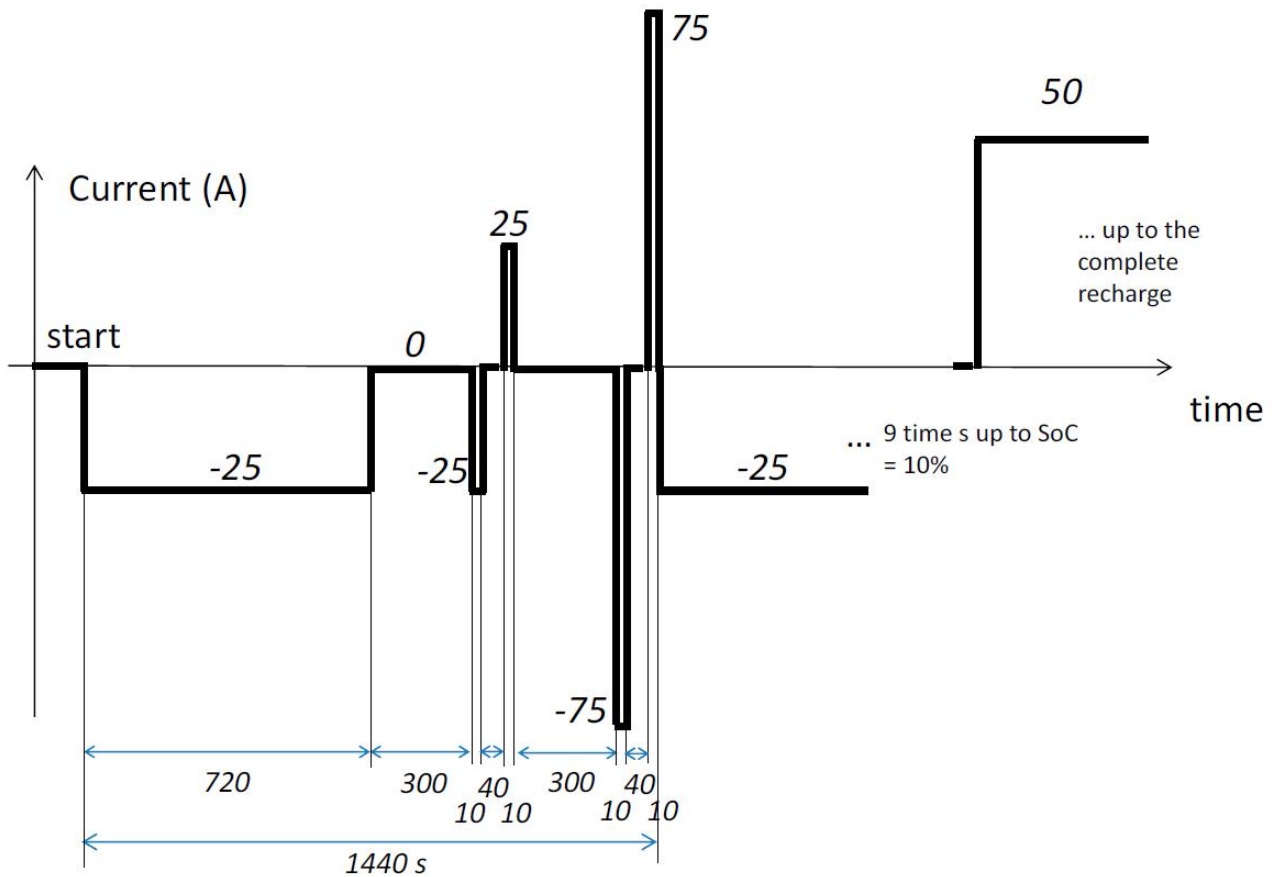
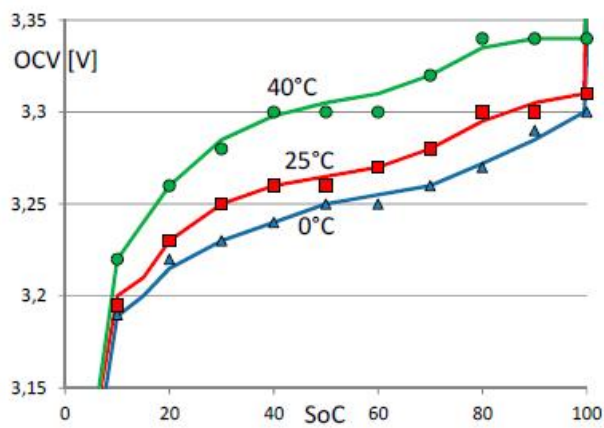


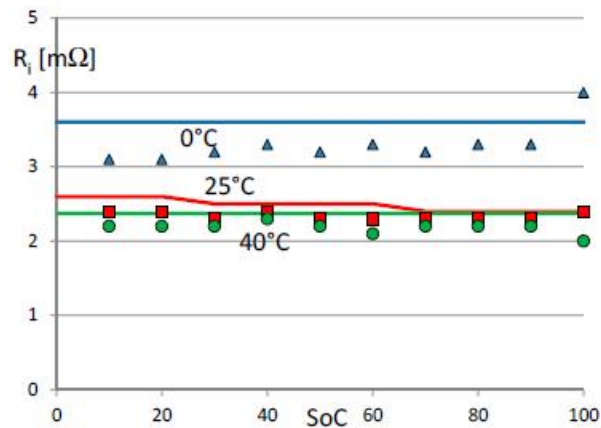
Figura 11: il profilo di corrente utilizzato per la caratterizzazione della cella

I test sono stati eseguiti ponendo la cella in una camera climatica mantenendo la temperatura ambiente costante a valori rispettivamente di 0°C, 25°C, 40°C. Sono stati memorizzati quindi tre differenti set di dati per le tre temperature.

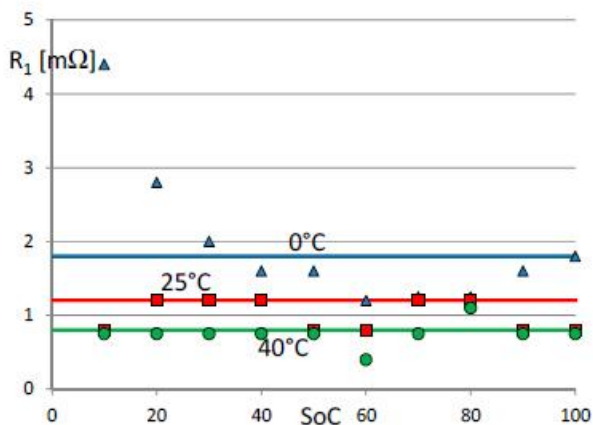
Le Figure 12 mostrano i valori dei parametri $OCV, R_i, R_1, C_1, R_{2dis}, C_2$ ottenuti mediante la procedura di estrazione descritta (rappresentati dai punti) ed il modello bidimensionale (SoC e temperatura) lineare a tratti (rappresentato da linee) dopo il processo di ottimizzazione. La tensione di circuito aperto della cella ha il tipico andamento non lineare: incrementa rapidamente quando il SoC è vicino al 100% e decrementa quando il SoC è vicino allo 0% mentre è meno variabile per valori di SoC intermedi. Inoltre è chiara anche la forte dipendenza diretta dalla temperatura. La forma del modello lineare a tratti ottimizzato è più regolare e arrotondato rispetto ai punti ricavati tramite la procedura di estrazione. La resistenza interna della cella, rappresentata da R_i, R_1, R_2 incrementa con la temperatura come già mostrato in altri lavori [32], [46]. L'incremento della resistenza e la riduzione dell'OCV causa il noto effetto di riduzione dell'efficienza delle batterie a basse temperature. R_{2dis} è trascurabile a temperature di 25°C e 40°C, come mostrato in Figura 12d. Al contrario, il suo valore incrementa durante la scarica a 0°C per valori di SoC basso.



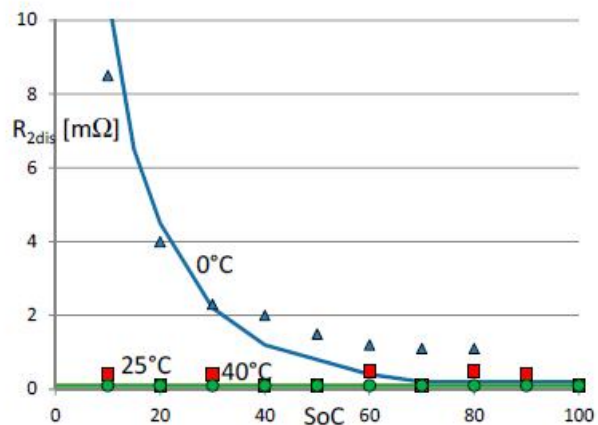
(a)



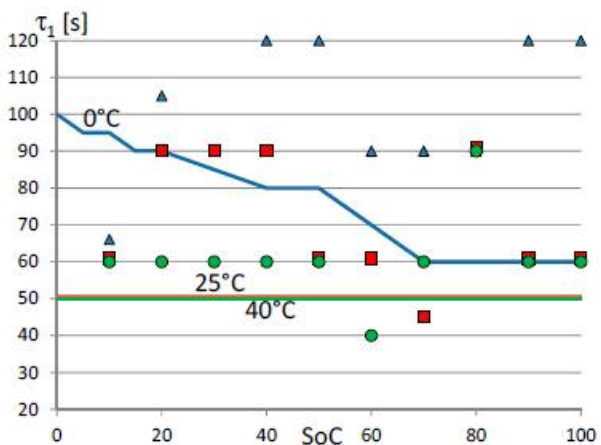
(b)



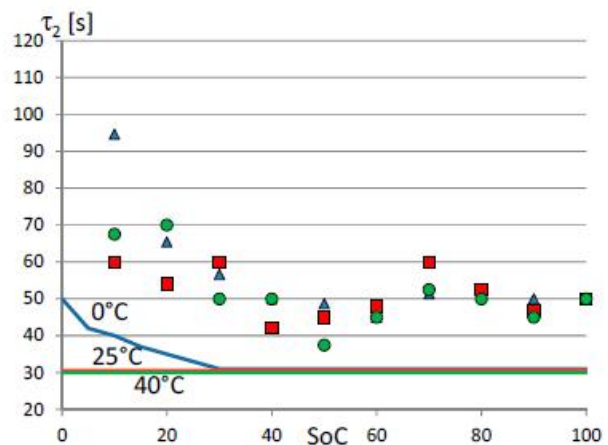
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 12: Valori dei parametri della cella: dopo la procedura di estrazione (punti) e dopo le ottimizzazioni (linee). (a) OCV ; (b) R_i ; (c) R_1 ; (d) R_{2dis} ; (e) τ_1 ; (f) τ_2 . Tutti i parametri sono funzione del SoC e della temperatura

Poiché il valore di R_{2dis} è molto basso durante il processo di ricarica finale della cella nel test HPPC modificato, si è deciso di utilizzare il modello di Figura 7b introducendo i diodi ideali

anziché il modello di Figura 7a. Questo effetto è stato modellato in [26], [28], [47] con dell'isteresi nel valore di OCV.

In Figura 12c si nota che la procedura di estrazione mette in risalto un incremento di R_1 per valori di SoC bassi, come visto per R_2 tuttavia nel modello lineare a tratti ottimizzato (linee) questo effetto viene attribuito solo ad R_2 . In Figura 12e,f si nota che le costanti di tempo τ_1 e τ_2 , variano in maniera irregolare come funzione della temperatura e del SoC quando vengono stimati tramite la procedura di estrazione (punti). In sintesi con la sola procedura di estrazione non è stato semplice discriminare i contributi dati da R_1C_1 e da $R_{2dis}C_2$ quindi tramite il processo di ottimizzazione si è riusciti a fornire un comportamento più regolare e smussato al modello in funzione del SoC e della temperatura.

3.2 Il SystemC-WMS

L'ambiente di simulazione utilizzato per simulare la singola cella al lito, il battery-pack composto da diverse celle connesse in serie ed in parallelo e il Battery Management System è il SystemC-WMS [48] [49]

Il SystemC-WMS è una libreria del C++ che consente la descrizione in SystemC di blocchi analogici eterogenei (elettronica analogica, meccanici, termici). System-C è stato utilizzato per progettare, simulare e debuggare System-on-Chip descritti a livello di sistema. La tecnica sviluppata per il SystemC-WMS è basata sull'utilizzo di alcuni moduli le cui interfacce analogiche standard basate sul "wave-exchange". Per questo motivo, i parametri a e b sono utilizzati come quantità di ingresso/uscita. SystemC fornisce un kernel event-driven che pianifica l'esecuzione dei processi che implementano le funzionalità dei moduli e dei canali. Oltre allo scheduler è stato implementato un risolutore di equazioni differenziali ordinarie (ODE), che permette l'utilizzo di moduli analogici descritti da ODE del tipo:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}; \mathbf{a}) \\ \mathbf{b} = \mathbf{g}(\mathbf{x}; \mathbf{a}) \end{cases} \quad (20)$$

Dove \mathbf{f} e \mathbf{g} sono espressioni vettoriali che descrivono la dinamica del sistema, mentre \mathbf{x} , \mathbf{b} ed \mathbf{a} sono rispettivamente i vettori di stato, di uscita e di ingresso. L'uso del modello ad onda incidente/riflessa semplifica il problema della connessione fra i moduli perché è plausibile che i moduli utilizzino onde incidenti come ingressi e producano onde riflesse come uscite. Le connessioni fra i moduli in serie, in parallelo, od altri tipi di connessioni sono effettuate utilizzando degli opportuni canali, chiamati "wave-channel" che distribuiscono onde ai moduli connessi insieme e permettono la definizione di interfacce analogiche e generiche utilizzabili in una grande varietà di casi.

In Figura 9 vengono mostrati in alto lo schema elettrico circuitale del modello termico, ed in basso la sua rappresentazione in SystemC-WMS. Nello schema in SystemC-WMS, i rettangoli rappresentano i moduli descritti in termini di parametri a e b , mentre i cerchi rappresentano le connessioni fra i moduli, chiamate "wavechannels". I moduli possono descrivere i sistemi in vari domini: elettrico, termico, meccanico, acustico, idraulico, rotazionale e trifase. Il SystemC-WMS è liberamente scaricabile online da [50] e sono già disponibili diverse librerie di moduli. Il vantaggio di utilizzare SystemC-WMS è dato dalla possibilità di integrare il modello della singola cella al litio in un ambiente complesso che include, ad esempio, un BMS, il CAN-BUS, ed il modello del motore elettrico alimentati dalla batteria.

3.3 Validazione del modello elettro-termico su una singola cella

I livelli di accuratezza del modello raggiunti sono mostrati nelle Figure 13-15. Figura 13 mostra la tensione di cella misurata durante il test, il SoC, ed i valori delle simulazioni eseguite in Simulink e System-C WMS utilizzando i parametri ottenuti usando le procedure di estrazione descritte ed i conseguenti modelli risultanti dalle successive ottimizzazioni. In Figura 13 viene mostrato il test e la risposta del modello quando la temperatura della camera climatica è stata imposta a 0°C mentre in Figura 14 e Figura 15 sono mostrati i risultati alle temperature di 25°C e 40°C.

Le misure e le simulazioni mostrate nelle Figure 13-15 evidenziano che la tensione di cella è più bassa a basse temperature, soprattutto quando la cella è scarica (SoC limitato). Durante i due impulsi consecutivi di scarica e carica a 25 A e 75 A, gli effetti di R_1C_1 e $R_{2dis}C_2$ sono trascurabili. Gli effetti degli impulsi di corrente sulla tensione di uscita sono principalmente legati al valore di R_i . Le Figure 13-15 evidenziano la capacità del modello di seguire accuratamente i transienti durante questi impulsi di corrente. La dipendenza di R_i dalla temperatura permette una buona corrispondenza a tutte le temperature considerate. La possibile dipendenza di R_i dai valori dell'intensità di corrente non è necessaria quindi non è stata inclusa nel modello.

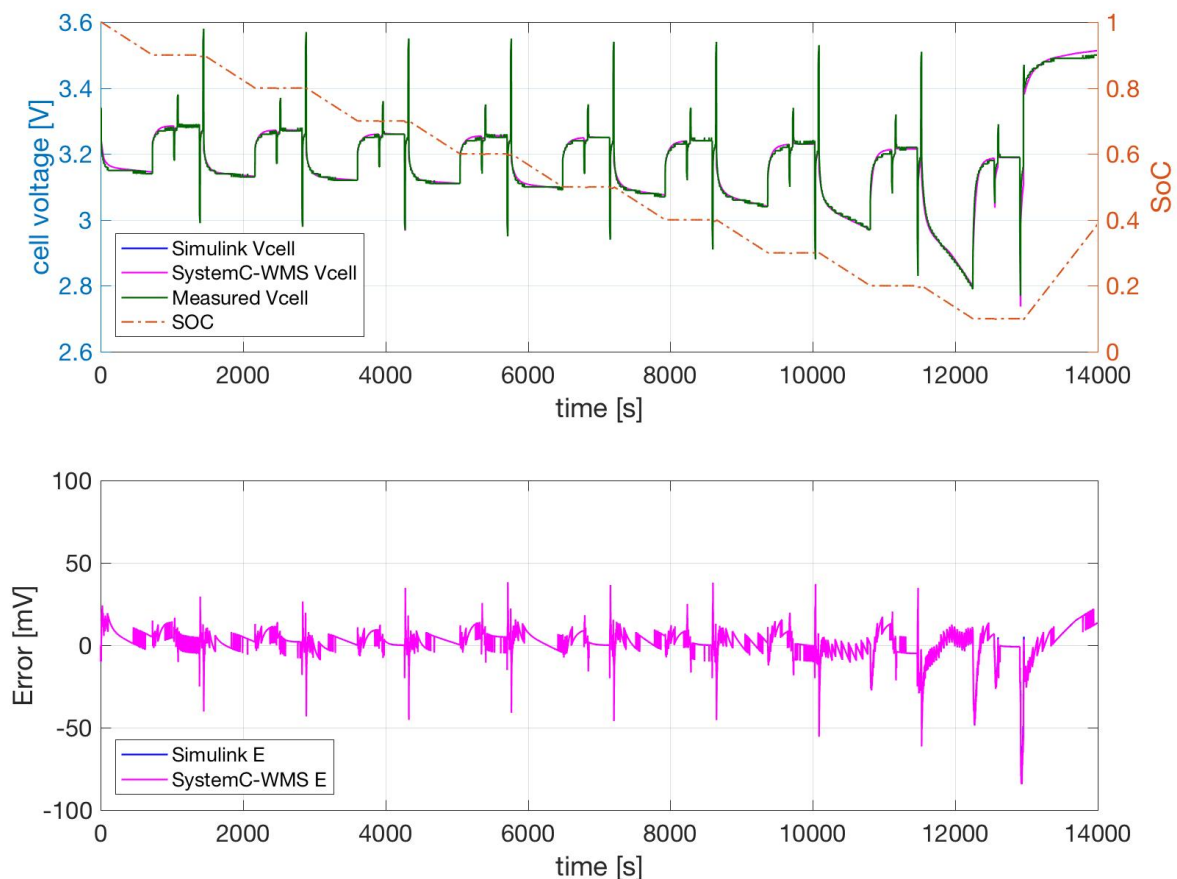


Figura 13: La tensione di cella misurata, il SoC e le simulazioni del modello di cella mostrato in Figura 7b eseguite in SystemC-WMS ed in Simulink. I parametri del modello sono stati ottenuti con le procedure di estrazione ed ottimizzazione a temperatura costante $T=0^{\circ}\text{C}$. In basso viene mostrato l'errore tra la simulazione in SystemC-WMS e le misure e tra la simulazione in Simulink e le misure.

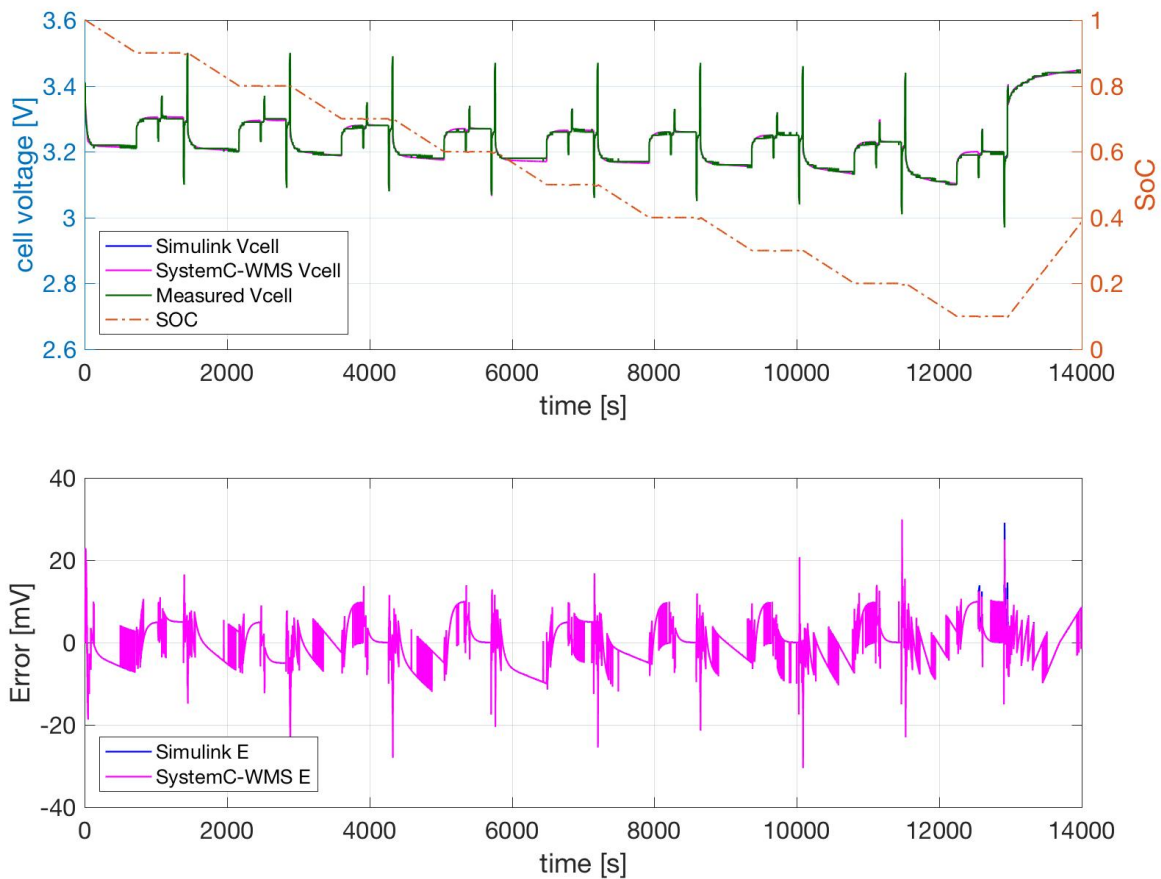


Figura 14: La tensione di cella misurata, il SoC e le simulazioni del modello di cella mostrato in Figura 7b eseguite in SystemC-WMS ed in Simulink. I parametri del modello sono stati ottenuti con le procedure di estrazione ed ottimizzazione a temperatura costante $T=25^{\circ}\text{C}$. In basso viene mostrato l'errore tra la simulazione in SystemC-WMS e le misure e tra la simulazione in Simulink e le misure.

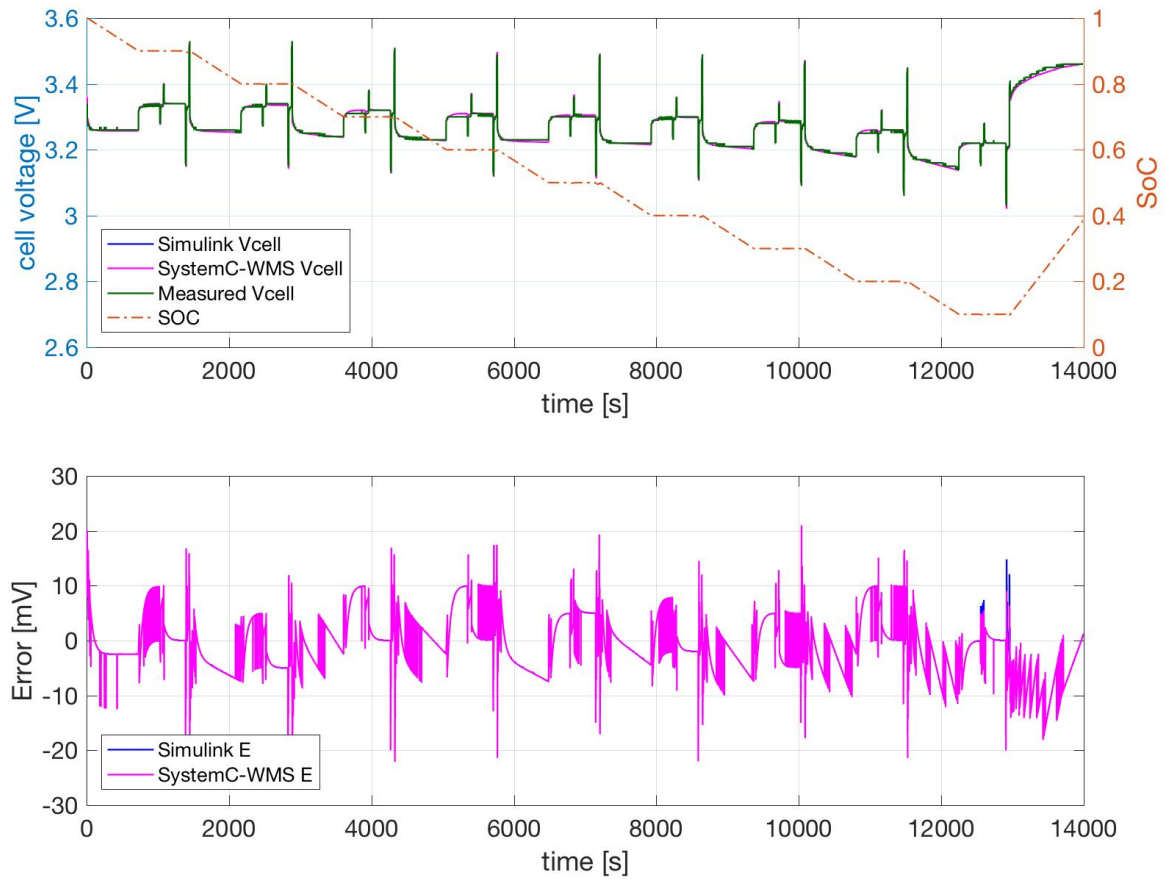


Figura 15: La tensione di cella misurata, il SoC e le simulazioni del modello di cella mostrato in Figura 7b eseguite in SystemC-WMS ed in Simulink. I parametri del modello sono stati ottenuti con le procedure di estrazione ed ottimizzazione a temperatura costante $T=40^{\circ}\text{C}$. In basso viene mostrato l'errore tra la simulazione in SystemC-WMS e le misure e tra la simulazione in Simulink e le misure.

3.4 Simulazione di un battery pack 8S6P ed analisi sugli effetti della variazione statistica dei parametri

Una batteria è spesso costituita da celle connesse in serie e/o parallelo e può essere modellata come singolo blocco, come descritto in [27]–[35], [51], tuttavia questo tipo di modello non può essere utilizzato per analizzare gli effetti del mismatch fra le singole celle sulle performances della batteria. Solitamente il pacco batteria è costituito da gruppi di celle facenti parte dello stesso lotto produttivo ma anche piccole differenze fra le celle possono causare diversi problemi. Durante la carica della batteria, OCV differenti fra le celle portano ad una sovraccarica delle celle con OCV più alto. Allo stesso modo, le celle con la tensione di circuito aperto più bassa possono causare problemi di sotto-scarica quando la batteria viene scaricata. Un problema duale è presente quando le celle vengono connesse in parallelo: le tensioni di cella sono forzate ad essere le stesse mentre il SoC delle celle può essere differente. Come conseguenza si ha che alcune celle possono raggiungere un SoC dello 0% mentre altre potrebbero conservare ancora della carica residua. Le differenze di temperatura fra le celle, portando ad avere anche differenze nel valore dei parametri del modello.

Una prima simulazione della batteria è stata eseguita collegando fra loro i modelli delle singole celle analizzati nel paragrafo 3.1. In particolare, la batteria simulata è composta da otto moduli in serie dove ogni modulo è a sua volta composto da sei celle in parallelo (configurazione 8S6P). Il modulo è mostrato in Figura 16. Nel caso specifico, il calore generato da ogni cella si propaga verso le celle adiacenti e viene trasferito verso la superficie esterna mediante conduzione termica. Ciò significa che la resistenza termica fra celle adiacenti R_{cnt} non può essere trascurata.

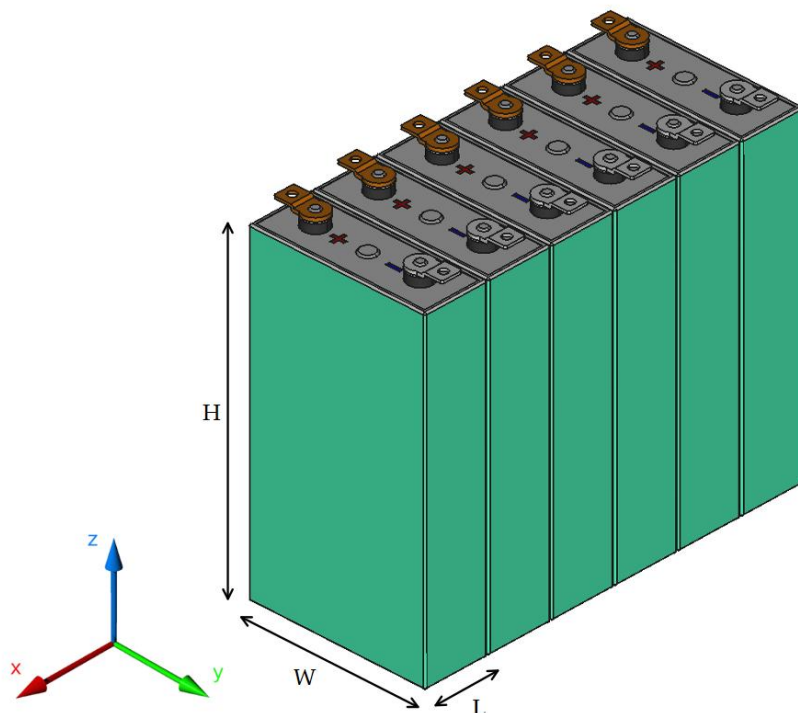


Figura 16: Un modulo del pacco batteria simulato composto da sei celle LiFePO4 da 50 Ah.

Il pacco batteria completo si trova a contatto, tipicamente, con un box metallico ed il calore viene dissipato verso l'ambiente esterno per convezione. La potenza termica scambiata dalle celle esterne viene così modellata dalla convezione termica $G_{conv2}=hA_2$, dove A_2 è l'area della parete dissipante. La potenza termica scambiata fra le celle interne è invece data dalla conduttanza termica $G_{conv1}=hA_1$, dove A_1 è l'area di una faccia laterale della cella. In Tabella 5 sono riportati i coefficienti termici ed i parametri geometrici utilizzati per la simulazione del pacco batteria insieme ai parametri della singola cella riportati nella Tabella 4.

Tabella 5: I parametri geometrici e termici del pacco batteria simulato.

Area trasversale $A=WH$	0,019 m^2
Area periferica $A_1=2(W+H)L$	0,022 m^2
Area periferica $A_2=A_1+A$	0,041 m^2
Conducibilità termica del case k_s [27]	58 $\frac{W}{mK}$
Spessore del case della cella d (mm)	2 mm
Resistenza termica di conduzione $R_{cnt}=\frac{d}{k_s A}$	0,003 $\frac{K}{W}$
Resistenza termica di convezione $R_{conv1}=\frac{1}{h A_1}$	1,184 $\frac{K}{W}$
Resistenza termica di convezione $R_{conv2}=\frac{1}{h A_2}$	0,625 $\frac{K}{W}$

Partendo dal modello di una singola cella è stato semplice creare un modello di una batteria composta da un numero M di celle connesse in serie ed N in parallelo. In Figura 17 viene riportato lo schema System-C WMS del modulo composto da un numero generico di celle M connesse in serie.

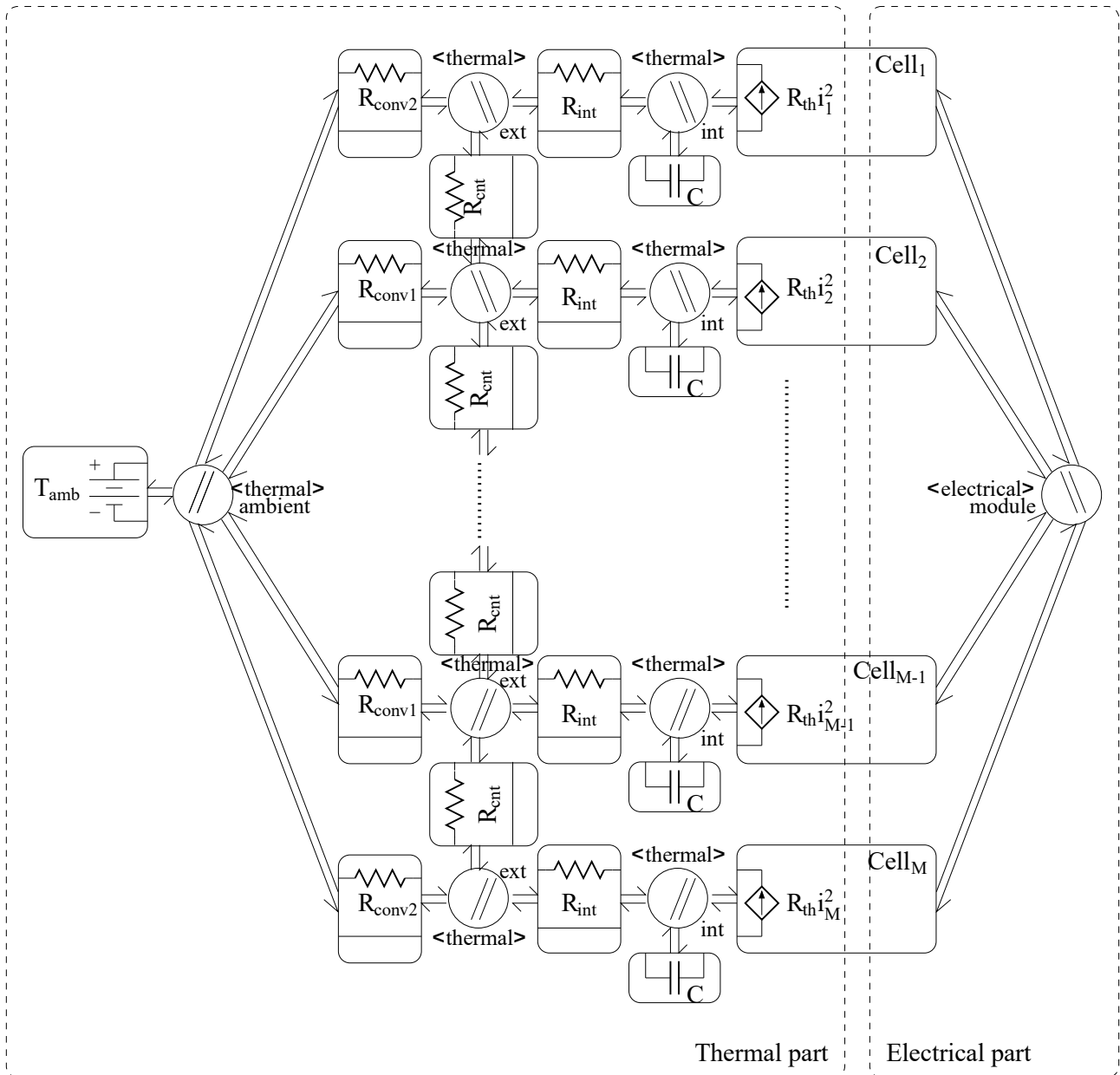


Figura 17: Il modello di un modulo composto da M celle in parallelo in System-C WMS

Il codice System-C WMS che corrisponde allo schema è listato di seguito. L'utente deve dichiarare la cella al litio e connettere le sue porte: una porta elettrica, e_port; una porta termica, th_port; ed una porta System-C clock, clock_port che controlla il periodo di campionamento dei parametri della cella che variano in funzione della temperatura e del SoC del corrispettivo canale. Il numero delle celle connesse in serie ed in parallelo può essere variato in maniera molto semplice intervenendo sui parametri M ed N.

```

for(unsigned i = 0; i < M; i++){ //series
  for(unsigned j = 0; j < N; j++){ // parallel
    // Cells
    std::string name = "B_cell_" + std::to_string(i)+ std::to_string(j);
    B_cell[i][j] = new Li_cell_itrp(name.c_str(), param_names,
    soc_i+soc_n(engine), Qnom+Qnom_n(engine),
    *params[i][j]);
    B_cell[i][j]->e_port(Cell_ch_sh[i]);
  }
}

```

```

B_cell[i][j]->th_port(Cell_th_ch_int[i][j]);
B_cell[i][j]->clock_port(clk);
B_cell[i][j]->set_steplimits(1.0e-2, 1.0);
B_cell[i][j]->set_tolerances (1e-9, 1e-3, 1e-1);
// Thermal resistance from inner of the cell to outside
name = "Rint_" + std::to_string(i)+ std::to_string(j);
Rint[i][j] = new Thermal_resistance(name.c_str(), Rin_val);
(*Rint[i][j])(Cell_th_ch_int[i][j],Cell_th_ch_ext[i][j]);
// Thermal resistance between a couple of cell
if ((i*N+j != M*N/2-1)&&(i*N+j != M*N-1))
    if (j<N-1) {
        name = "Rcnt_" + std::to_string(i)+ std::to_string(j);
        Rcnt[i][j] = new Thermal_resistance(name.c_str(), Rcnt_val);
        (*Rcnt[i][j])(Cell_th_ch_ext[i][j],Cell_th_ch_ext[i][j+1]);
    } else {
        name = "Rcnt_" + std::to_string(i)+ std::to_string(j);
        Rcnt[i][j] = new Thermal_resistance(name.c_str(), Rcnt_val);
        (*Rcnt[i][j])(Cell_th_ch_ext[i+1][0],Cell_th_ch_ext[i][j]);
    };
// Thermal capacitance of the cell
name = "C_" + std::to_string(i)+ std::to_string(j);
Cap[i][j] = new Thermal_capacitance(name.c_str(), Cap_val);

```

Un aspetto molto importante inerente il pacco batteria è la disomogeneità fra le celle quindi il BMS che gestirà la batteria si dovrà occupare della controllo del bilanciamento di carica fra le diverse celle [52]. Nell'ambiente di simulazione proposto viene tenuto conto di questa disomogeneità aggiungendo una variabile casuale (distribuzione normale con una deviazione standard definibile dall'utente) ai valori dei parametri del modello della cella (OCV , R_i , R_1 , C_1 , R_{2dis} , C_2 , R_{in} , R_{cnt} , R_{conv1} , R_{conv2} , C), il valore nominale della capacità (Q_{nom}) ed il SoC iniziale (SoC_{init}). Le Figure 18-23 riportano i risultati della simulazione del pacco batterie eseguita considerando la disomogeneità fra le differenti celle. L'entità delle variazioni statistiche dei parametri delle celle sono state scelte analizzando le misure effettuate su diverse celle al litio, riportate in [5], [29], [53], [54]. Di seguito vengono indicate le deviazioni standard delle varie variabili utilizzate:

$$\sigma_{Q_{nom}} = 3,33\%; \quad (21)$$

$$\sigma_{SoC_{init}} = 1,66\%; \quad (22)$$

$$\sigma_{OCV} = 0,5\%; \quad (23)$$

$$\sigma_{R_i} = \sigma_{R_1} = \sigma_{R_{2dis}} = \sigma_{C_1} = \sigma_{C_2} = 3,33\%; \quad (24)$$

Utilizzando queste deviazioni standard è stato simulato, in System-C WMS, un modello di pacco batteria che include le variazioni statistiche fra le celle. La batteria simulata è quindi composta da 8 celle in serie e 6 in parallelo con caratteristiche differenti. La capacità nominale del pacco è 50 Ah quindi la capacità nominale dell'intera batteria è di 300 Ah con una tensione nominale di $3,2 \text{ V} \times 8 = 25,6 \text{ V}$. I valor medi dei parametri sono rappresentati in Figura 12, mentre la temperatura ambiente e la temperatura delle celle è di 25°C ed il SoC iniziale delle celle è di 95%. Durante la simulazione di un'ora, è stata simulata una corrente di scarica 200 A dall'intero pacco batteria, quindi una corrente media di 33,33 A per cella.

Le Figure 18-23 mostrano i risultati delle simulazioni dove vengono visualizzati i dati per le 48 celle. Le curve sono raffigurate in otto colori differenti, dove lo stesso colore viene utilizzato per tutte le celle connesse in parallelo fra loro. In particolare, Figura 18 mostra il SoC delle 48 celle. Il SoC iniziale parte dal 95% con una variazione statistica fra cella e cella imposta tramite la variabile casuale con deviazione standard descritta dalla (22). Figura 19 invece mostra la corrente che fluisce in ogni cella. A causa dei differenti valori dei parametri delle celle (ad es. una variazione dell'OCV delle celle), le celle connesse in parallelo sono interessate da correnti differenti: la cella con OCV più elevata fornisce una corrente maggiore rispetto alle celle con OCV più ridotta. Dato che la corrente totale di scarica simulata è 200 A, la corrente media di scarica per cella è di $200 / 6 = 33,33$ A. La cella che sta fornendo più corrente si scarica prima delle altre come è chiaro dalla pendenza del SoC di Figura 18. Al termine della simulazione alcune celle hanno un SoC del 10%, mentre altre hanno un SoC vicino al 50%. Da Figura 12 si nota che il valore di OCV della cella si decrementa rapidamente quando la cella è molto scarica. Le celle che forniscono più corrente nella prima parte della scarica hanno un SoC inferiore alle altre al termine della scarica, quindi forniscono anche meno corrente negli ultimi istanti di simulazione. La riduzione della disuguaglianza delle correnti delle celle alla fine della simulazione (Figura 19) evidenzia questo effetto.

La carica totale fornita dalla batteria durante la simulazione è di 200 Ah, pari ai due terzi della capacità nominale. Dopo un ora, il SoC di una batteria ideale equivalente dovrebbe essere $(0,95 - 200 \text{ Ah} / 300 \text{ Ah}) = 28,3\%$. Il SoC nominale della batteria dovrebbe raggiungere il 10% (ossia il valore nominale che consente di preservare le celle) dopo $(0,95 - 0,1) \times 300 \text{ Ah} / 200 \text{ A} = 1 \text{ ora } 16 \text{ min}$. Al contrario, in seguito alla disomogeneità delle celle, Figura 18 mostra che almeno una delle celle raggiunge il 10% del SoC in un ora, con una riduzione del 78% rispetto la durata di un pacco batteria ideale composto da celle perfettamente identiche.

L'ambiente di simulazione sviluppato permette quindi un'analisi dettagliata del comportamento di un pacco batteria composto da celle disomogenee con variazioni statistiche fra i parametri del modello che le descrivono. Tale analisi consente di sviluppare ed ottimizzare gli algoritmi di bilanciamento di carica dei BMS.

La Figura 20 mostra la tensione di uscita nel tempo degli otto moduli connessi in serie e Figura 21 mostra la tensione dell'intera batteria. La caduta di tensione iniziale nei primi 200 s di simulazione è dovuta alle resistenze e capacità interne al modello delle celle. Negli istanti successivi invece la tensione diminuisce a causa della diminuzione del SoC e quindi dell'OCV che ha una dipendenza diretta dal SoC. La variazione fra le tensioni degli otto moduli che compongono il pacco batteria è piuttosto evidente sebbene ogni modulo sia composto da ben sei celle che dovrebbero parzialmente mitigare le differenze statistiche fra i parametri dei moduli.

Le differenze fra gli otto moduli in serie sono principalmente dovute alle variazioni dell'OCV. Alla fine della simulazione, qualche cella ha un SoC basso che causa una riduzione dell'OCV e di conseguenza una riduzione della tensione del modulo (mostrata in Figura 20), portando ad una riduzione della tensione dell'intera batteria (Figura 21).

La Figura 22 mostra le 48 temperature interne ed esterne delle celle. Le variazioni fra le temperature esterne delle celle sono minime ed in Figura 22 sono raffigurate in basso apparendo come una curva unica più spessa. Le curve più in alto invece rappresentano le temperature interne. Le temperature si incrementano durante la simulazione a causa della generazione di calore

all'interno di ogni cella e la temperatura a regime si ottiene solo a fine simulazione. La differenza di temperatura interna è causata dai diversi valori assunti dai parametri termici ma principalmente dalle diverse correnti che interessano le celle.

Figura 23 mostra i 48 flussi di calore delle celle. Le variazioni sono dovute, principalmente, al fatto che le celle sono interessate da correnti diverse fra loro. Gli effetti della variazione di temperatura sui parametri delle celle (OCV e resistenze interne) sono considerati nell'ambiente di simulazione. D'altra parte gli effetti di un eventuale riscaldamento o raffreddamento delle celle che compongono la batteria potrebbero essere considerati semplicemente cambiando i parametri termici del modello.

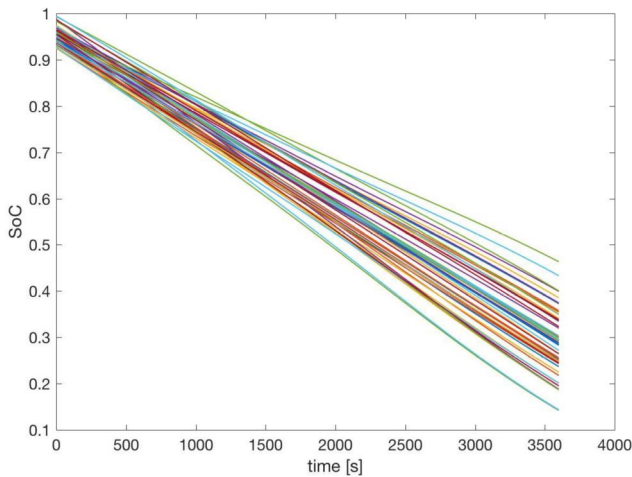


Figura 18: Il SoC delle 48 celle

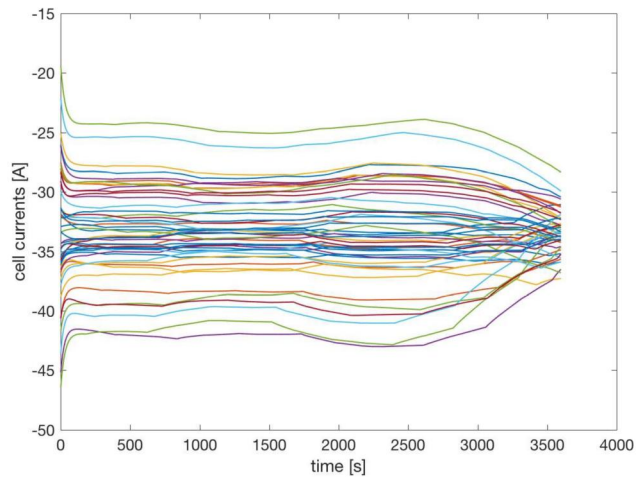


Figura 19: La corrente delle 48 celle

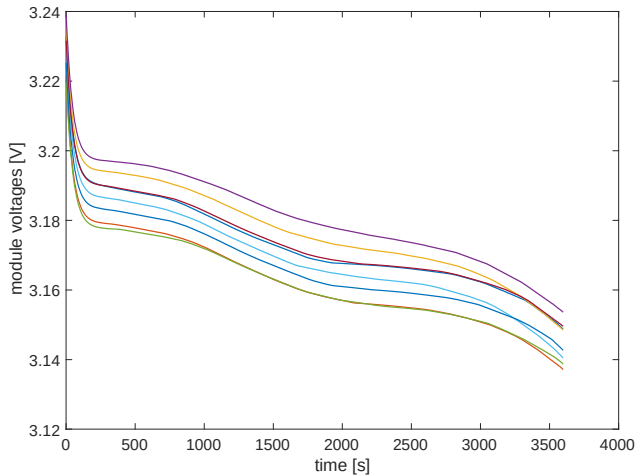


Figura 20: La tensione degli otto moduli connessi in serie

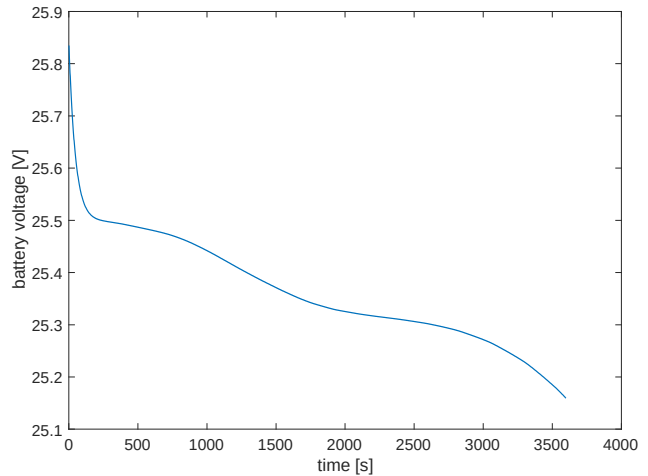


Figura 21: La tensione della batteria

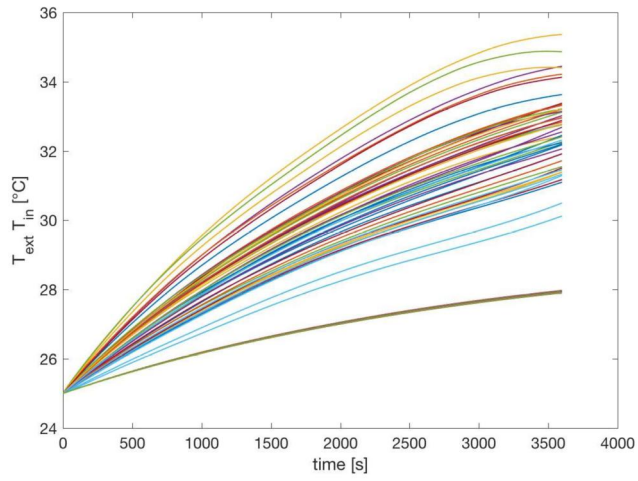


Figura 22: le 48 temperature interne e le 48 temperature esterne delle celle

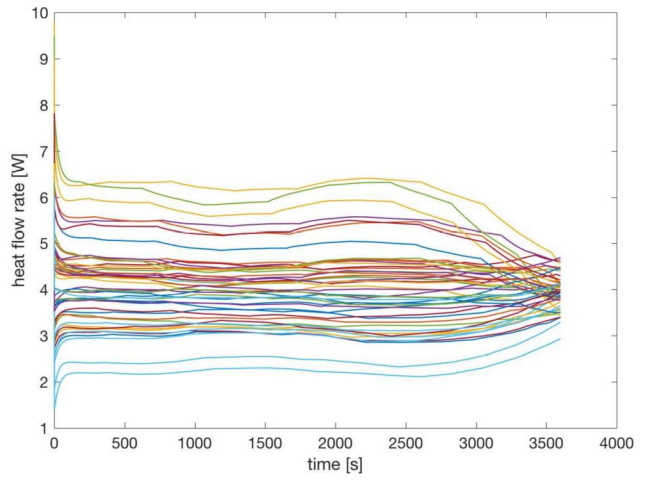


Figura 23: Il flusso di calore di ogni cella

3.5 La caratterizzazione statistica di un modulo 1S6P

Un aspetto fondamentale per cui si deve utilizzare un BMS all'interno delle batterie al litio è perché le celle al litio utilizzate presentano delle disomogeneità fra loro che si possono tradurre in variazioni statistiche dei valori dei parametri del modello che le rappresenta. Quando le celle sono connesse in serie ed in parallelo gli effetti delle disequaglianze fra le celle comportano delle degradazioni delle prestazioni della batteria. Si assuma ad esempio una batteria composta da celle con diversi valori di OCV: durante la carica, le celle con OCV maggiore potrebbero essere sovraccaricate. In maniera analoga, le celle con valori di OCV più bassi potrebbero essere sovrascaricate durante le fasi di scarica della batteria. Un problema duale è presente anche quando le celle sono connesse in parallelo: le tensioni delle celle sono forzate ad essere le stesse ma i valori dello stato di carica delle celle potrebbero essere differenti fra loro. Di conseguenza si potrebbero avere alcune celle con un SoC dello 0% ed essere inutilizzabili mentre altre potrebbero avere ancora della carica residua che non verrebbe sfruttata. Nonostante la rilevanza del problema, non esiste un ambiente di simulazione capace di verificare ed ottimizzare gli algoritmi di bilanciamento dei BMS che hanno a che fare con il problema della disomogeneità del pacco batteria.

Per valutare gli effetti della variazione dei diversi parametri del modello sulle prestazioni della batteria, sono state eseguite diverse simulazioni aggiungendo un valore casuale (distribuzione normale con una deviazione standard definita dall'utente) ai parametri (OCV , R_i , R_1 , C_1 , R_2 , C_2 , R_{int} , R_{cnt} , R_{conv1} , C), alla capacità nominale della cella Q_{nom} ed al SoC iniziale SoC_{init} del modello elettro-termico della singola cella presentato nel paragrafo 3.1. Le variazioni statistiche tipiche delle celle al litio considerando il modello di Randle sono nel range compreso fra l'1% ed il 10% [5], [29], [53], [54]. Prima di assemblare il pacco batteria, il progettista, dovrebbe andare a misurare i valori dei parametri delle celle utilizzate al fine di selezionare celle simili per rendere la batteria la più omogenea possibile. L'analisi degli effetti della diversità fra i valori dei parametri sarà quindi utile per definire i limiti delle deviazioni massime consentite.

Il modello elettro-termico del modulo da 6 celle connesse in parallelo e descritto dalle Figure 16 e 17 è stato utilizzato per realizzare una serie di simulazioni Montecarlo utilizzando le variazioni statistiche appena descritte. Il modulo composto dal parallelo di 6 celle LiFePO4 di capacità nominale 50 Ah ciascuna presenta una tensione nominale di 3,2 V e quindi si ha una capacità nominale totale di 300 Ah. La simulazione è stata effettuata mantenendo la temperatura ambiente a 25°C costanti e partendo con un SoC iniziale del 95%. Il modulo è stato sottoposto ad una scarica a corrente costante di 200 A per tutta la durata della simulazione di 3600 s (1 ora), quindi con una corrente media per cella di 33,33 A.

Sono state eseguite una serie di simulazioni adottando delle variazioni statistiche dei parametri del modello con deviazioni standard dallo 0% al 10%. Ciò ha permesso di analizzare gli effetti delle variazioni dei singoli parametri sulle prestazioni della batteria. Per ogni parametro e per ogni deviazione standard sono state eseguite 50 simulazioni.

Nelle Figure 24,25,26 vengono riportati, ad esempio, l'OCV, il SoC e la corrente durante la simulazione del modulo costituito da 6 celle. In particolare la simulazione è stata eseguita utilizzando una deviazione standard dell'1% per l'OCV. Nelle tre figure è stato utilizzato lo stesso colore per identificare la medesima cella. Come risulta da Figura 26, nonostante la corrente di

scarica della simulazione sia di 200 A, tale corrente non si distribuisce uniformemente fra le celle. La cella con il valore di OCV più alto nei primi istanti fornisce una corrente notevolmente superiore alle altre celle quindi il SoC di quella cella si decrementa velocemente e dopo 3400 s raggiunge il 10%. Da questo istante la sua OCV, che dipende dal SoC, diventa la più piccola fra le 6 celle e di conseguenza la corrente diminuisce. La differenza fra le correnti fornite dalle 6 celle si decrementa negli ultimi secondi di simulazione infatti le celle che forniscono inizialmente molta corrente alla fine della simulazione, essendo le celle più scariche, riducono il loro contributo di corrente. Dopo un'ora di scarica, la cella con l'OCV minore all'inizio della simulazione, possiede ancora un SoC del 50%. Dato che risulterebbe troppo estensiva fare un'analisi simile a quella delle Figure 24,25,26 per le variazioni di tutti i parametri, il valore medio e la deviazione standard di alcuni indicatori di performance sono state stimate da set di 50 simulazioni. Le prestazioni che sono state considerate sono descritte da vari indici:

- il tempo che impiega la cella con il SoC minore a raggiungere il 10%;
- la tensione del modulo dopo un'ora di scarica;
- il SoC minimo fra le sei celle dopo 40 min di scarica (2431 s, ossia il tempo richiesto da un modulo ideale per raggiungere il SoC del 50%);
- la differenza tra la corrente massima e quella minima fornita dalle sei celle dopo 2431 s;
- l'efficienza energetica, ossia l'energia fornita al carico normalizzata rispetto l'energia totale estratta dal modulo durante un'ora di scarica.

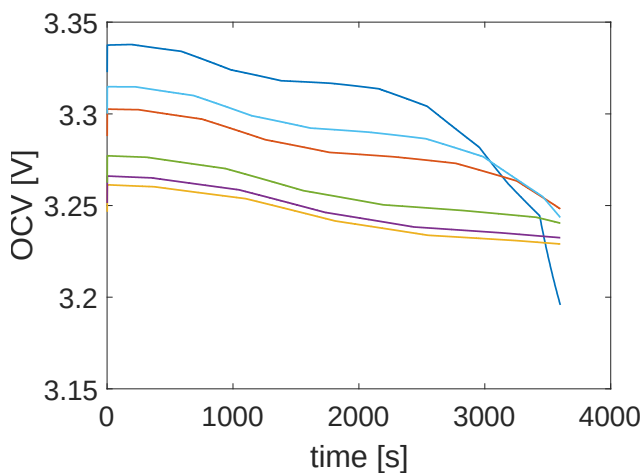


Figura 24: la tensione di circuito aperto (OCV) di ciascuna delle 6 celle durante la scarica usando dei valori di OCV con deviazione standard dell'1%.

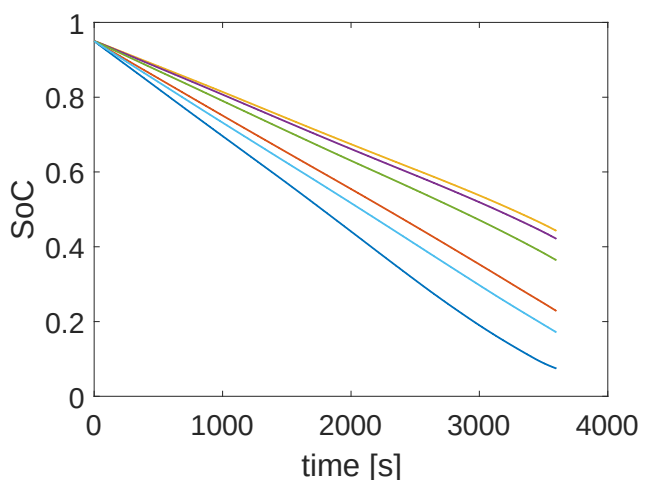


Figura 25: il SoC di ciascuna delle 6 celle durante la scarica usando dei valori di OCV con deviazione standard dell'1%.

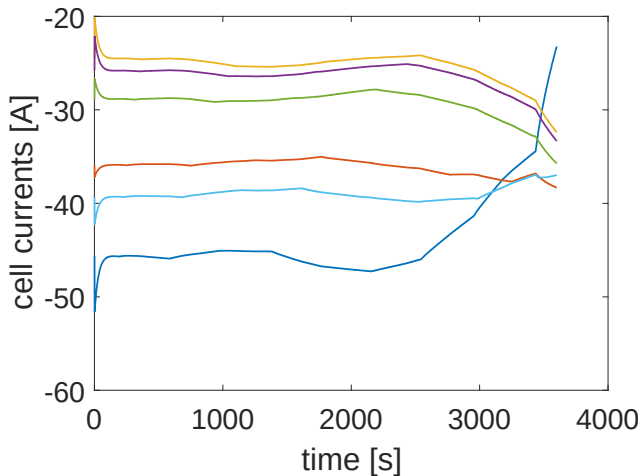


Figura 26: la corrente di ciascuna delle 6 celle durante la scarica usando dei valori di OCV con deviazione standard dell'1%.

In Figura 27 sono riportati i 50 campioni e il valor medio del tempo richiesto dalla cella con il SoC più basso a raggiungere il 10%, normalizzato rispetto al tempo richiesto da un modulo composto da sei celle identiche (4591 s) come funzione della deviazione standard dell'OCV.

Per estendere la vita delle batterie solitamente le celle non sono scaricate fino al SoC dello 0% ma si preferisce fermare la carica a valori di SoC del 10%. Quando più celle sono connesse in parallelo e sono differenti fra loro, una cella raggiungerà il 10% del SoC prima delle altre quindi connettere celle differenti fra loro nello stesso modulo comporta la perdita di una parte della capacità potenzialmente disponibile. Figura 27 mostra come l'effetto della disomogeneità fra gli OCV delle celle sia importante. Una sola variazione del 3% fra gli OCV delle celle dimezza, in media, il tempo di scarica della batteria. Nel caso peggiore il tempo si riduce fino al 30%. Questo perché un eventuale BMS capace di monitorare il SoC delle celle che costituiscono il modulo dovrebbe, in via teorica, fermare la scarica quando il SoC di ogni cella raggiunge il valore limite del 10%. Al contrario, se il BMS non ferma la scarica, l'SoH della cella più scarica, e di tutto il modulo si ridurrebbe drasticamente. La forte dipendenza di questo indice di valutazione considerato dall'OCV è dato dalla dipendenza non lineare dell'OCV dal SoC, lieve quando il SoC è fra il 20% ed il 90% e molto accentuata per valori di SoC bassi o alti. La cella con l'OCV più alto fornisce più corrente rispetto alle altre celle finché non raggiunge un SoC basso. Quindi le celle che dovranno essere connesse in parallelo devono avere una bassa variabilità sul valore dell'OCV.

In Figura 28 vengono rappresentati i 50 campioni ed il valor medio della tensione di uscita del modulo dopo un'ora di scarica in funzione della deviazione standard dell'OCV. Dopo un'ora di scarica gli effetti della variazione dell'OCV sul SoC delle celle è considerevole, quindi calcolando la media la tensione di uscita del modulo diminuisce. D'altra parte non è semplice individuare il fatto che una cella ha un SoC basso solo misurando la sua OCV: le altre celle potrebbero parzialmente compensare la cella con SoC basso. In particolare ciò è evidenziato dall'alta variabilità della tensione di uscita quando la deviazione standard dell'OCV è elevata.

In Figura 29 vengono mostrati i 50 campioni ed il valor medio del SoC minimo fra le sei celle che compongono il modulo dopo 40 minuti di simulazione (2431 s, il tempo necessario ad un modulo composto da celle ideali a raggiungere il SoC del 50%) in funzione della deviazione standard dell'OCV. In Figura 29 si nota come le variazioni delle OCV causano delle forti riduzioni del SoC di alcune celle anche dopo i primi istanti di simulazione e quindi la durata della batteria decrementa rapidamente, come già commentato analizzando le figure 24,25,26.

In Figura 30 vengono riportati i 50 campioni ed il valor medio della differenza fra le correnti massima e minima fornita dalle sei celle dopo circa 40 minuti di simulazione (2431 s) in funzione della deviazione standard dell'OCV. La differenza fra le correnti delle celle che vanno a compensare i diversi valori di OCV può essere elevata e questo causa una forte riduzione del SoC delle celle che hanno l'OCV più elevata.

In Figura 9 vengono mostrati i 50 campioni ed il valor medio dell'efficienza della cella durante un ora di scarica in funzione della deviazione standard dell'OCV. Questo valore dipende dalle perdite legate alle resistenze interne della celle, dove, nel caso di celle identiche l'efficienza è del 96,3%. La variazione dell'OCV incrementa leggermente le perdite interne delle celle raggiungendo valori di efficienza del 93,4% con deviazioni standard dell'OCV del 3,5%. In definitiva, le variazioni nei valori dell'OCV non solo riducono la capacità utilizzabile della batteria, ma anche la sua efficienza.

Anche le variazioni del valore nominale di capacità della cella Q_{nom} , del SoC iniziale SoC_{init} , e degli altri parametri del modello elettro-termico della cella ($R_i, R_1, C_1, R_2, C_2, R_{int}, R_{cnt}, R_{conv1}, C$) influenzano le prestazioni della batteria tuttavia il loro effetto è molto meno evidente rispetto alle variazioni dell'OCV. Per essere coincisi vengono riportati solo alcuni risultati delle rimanenti simulazioni. Figura 32 mostra i 50 campioni ed il tempo medio necessario, alla cella con il SoC minimo, a raggiungere il valore del 10% normalizzato rispetto al tempo necessario ad un modulo composto da 6 celle identiche (4591 s) in funzione della deviazione standard ([1,3,5,10]%) del valore della capacità nominale Q_{nom} .

In maniera simile, Figura 33, mostra lo stesso risultato in funzione della deviazione standard del SoC iniziale (SoC_{init}). Confrontando i risultati con quelli delle figure 24,25,26 si nota immediatamente la minor influenza della variazione di questi parametri (Q_{nom}, SoC_{init}) rispetto alla variazione dell'OCV sebbene il loro effetto sia comunque rilevante. In ultimo, Figura 34, mostra lo stesso risultato in funzione della deviazione standard di tutti i parametri. Dato che, tipicamente, l'OCV ha una variabilità tipica minore rispetto quella degli altri parametri, l'asse x di Figura 34 mostra il valore della deviazione standard dell'OCV mentre gli altri parametri hanno una deviazione standard 3 volte più grande.

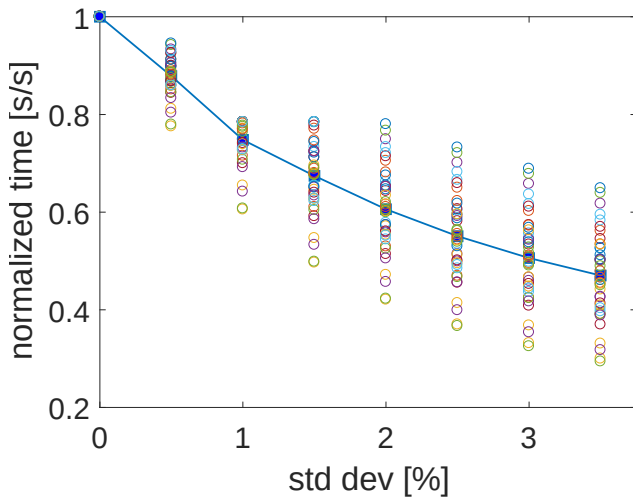


Figura 27: il tempo necessario affinché la cella con il SoC minimo raggiunga il 10%, normalizzato rispetto ad un modulo composto da 6 celle identiche.

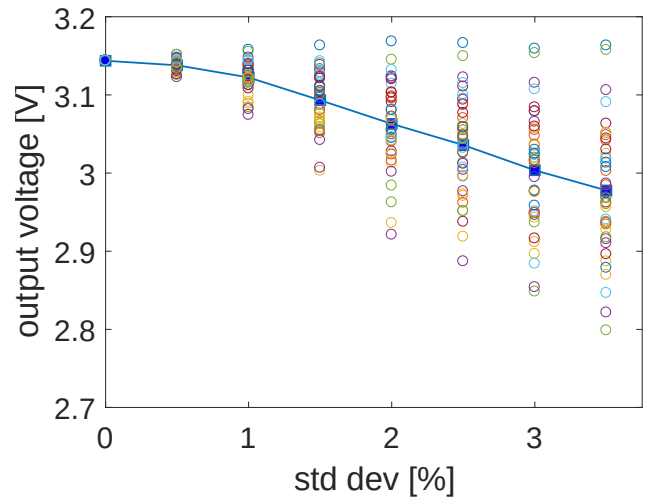


Figura 28: la tensione di uscita del modulo dopo un ora di scarica.

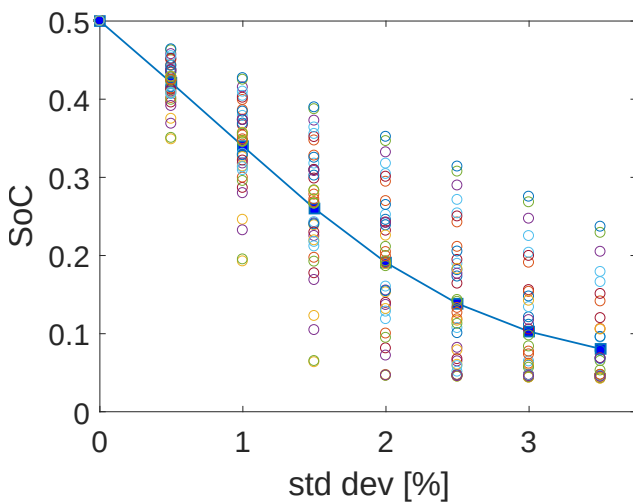


Figura 29: il SoC minimo fra le sei celle dopo 40 min di scarica.

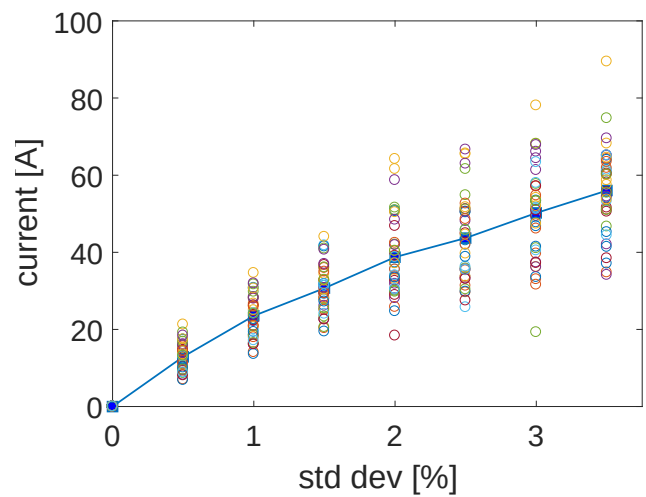


Figura 30: la differenza fra la corrente massima e quella minima fornita dalle sei celle dopo 40 min di scarica.

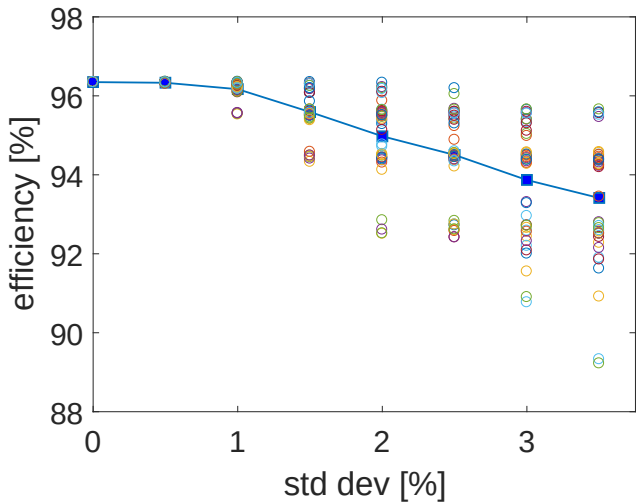


Figura 31: l'efficienza delle celle.

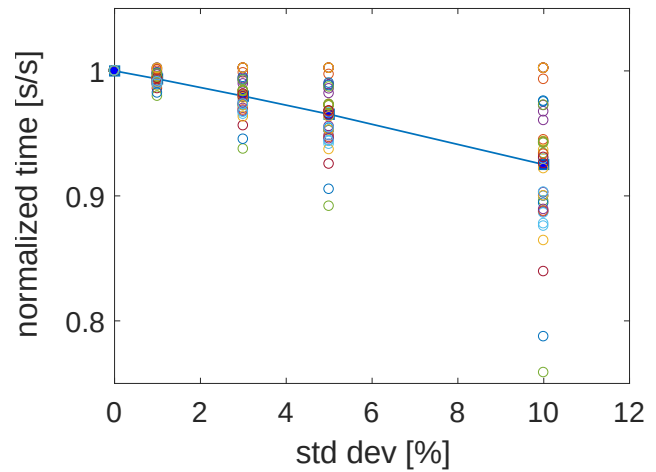


Figura 32: il tempo necessario affinché la cella con il SoC più basso raggiunga il 10%, normalizzato rispetto al tempo necessario ad un modulo composto da 6 celle identiche.

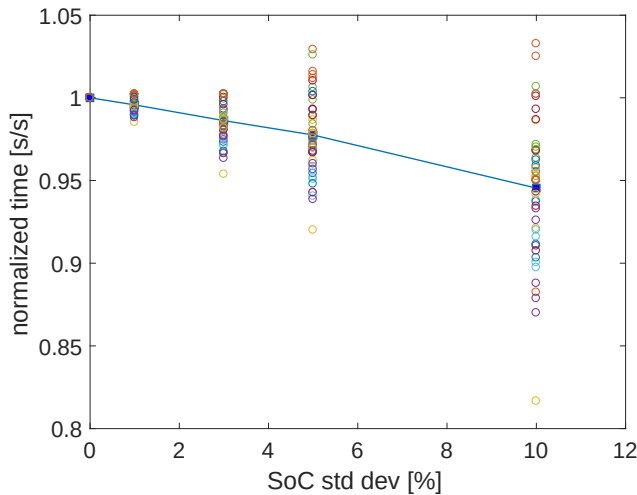


Figura 33: il tempo necessario affinché la cella con il SoC più basso raggiunga il 10%, normalizzato rispetto al tempo necessario ad un modulo composto da 6 celle identiche.

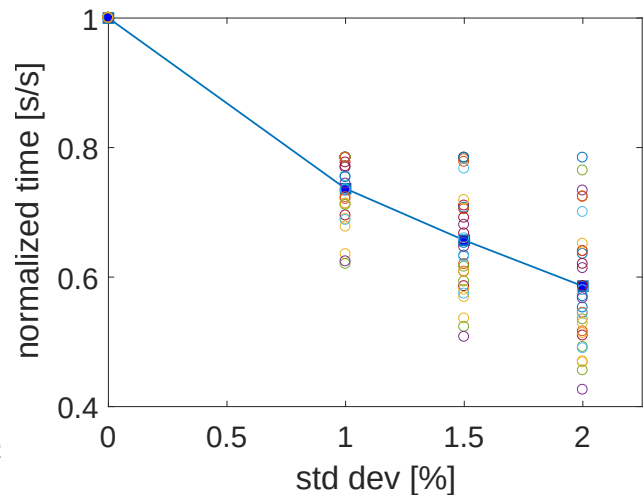


Figura 34: il tempo necessario affinché la cella con il SoC più basso raggiunga il 10%, normalizzato rispetto al tempo necessario ad un modulo composto da 6 celle identiche.

La stessa simulazione sul modulo composto da 6 celle in parallelo consente di analizzare anche le prestazioni durante il tempo di simulazione in funzione delle variazioni statistiche degli 8 parametri elettrici del modello (Q_{nom} , SoC_{init} , OCV , R_i , R_1 , C_1 , R_2 , C_2). Ad esempio, in Figura 35 viene mostrato l'andamento della tensione di uscita del modulo in funzione della variazione di tutti i parametri con deviazioni standard dell' 1%, 1,5%, 2% e 3%. Come riferimento viene mostrato in rosso con una linea tratteggiata anche l'andamento del modulo ideale con le 6 celle identiche. L'elevata differenza fra l'andamento nel caso ideale ed il valor medio delle simulazioni statistiche è dovuta all'andamento non lineare dell'OCV in funzione del SoC. Nei primi secondi si nota che la tensione di uscita è più alta rispetto al caso ideale. Ciò è dovuto al fatto che alcune celle hanno un SoC_{init} maggiore del valore nominale. Alla fine della simulazione alcune celle hanno un SoC molto

più basso di altre per cui la tensione di uscita si decrementa. In definitiva, le variazioni statistiche fra le celle causano un decremento della vita utile della batteria. Considerando che un modulo ideale raggiunge la tensione minima consentita dalla chimica delle celle dopo 3600 s, in media, lo stesso limite è raggiunto in soli 2000 s se la deviazione standard dei parametri è del 3%. La durata della batteria quindi decresce al 55% grazie al mismatch fra le celle.

In Figura 36 sono riportati gli andamenti delle deviazioni standard della tensione di uscita della batteria dopo 50 simulazioni utilizzando rispettivamente deviazioni standard di tutti i parametri dell'1%, 1,5%, 2% e 3%.

Nelle Figure 37-40 invece sono analizzati i casi specifici dove si è fatto variare un parametro alla volta: il SoC_{init} con deviazioni standard dell'1%, 3%, 5%, e 10% in Figura 37, la capacità della singola cella Q_{nom} con una deviazione standard dell'1%, 3%, 5%, e 10% in Figura 38, le resistenze interne R_i , R_1 , R_2 , con una deviazione standard dell'1%, 3%, 5%, e 10% in fig6, l'OCV con una deviazione standard dello 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5% e 3% in Figura 40. Da notare che le Figure 36-40 hanno differenti scale dell'asse y e diversi valori delle deviazioni standard dei parametri al fine di evidenziare gli effetti dei parametri sulla tensione di uscita del modulo.

Il comportamento della deviazione standard della tensione di uscita dipende dalla relazione non lineare delle 48 variabili (8 parametri Q_{nom} , SoC_{init} , OCV , R_i , R_1 , C_1 , R_2 , C_2 per ognuna delle 6 celle che compongono il modulo) in funzione del SoC e della temperatura e dalle equazioni non lineari descritte dalle equazioni (6) e (7). Le simulazioni in funzione del tempo considerando gli effetti delle variazioni di tutti i parametri mostrata in Figura 36 e dei singoli parametri nelle Figure 37-40 permettono di effettuare un'analisi approfondita del comportamento nel tempo.

Nel transiente iniziale, le variazioni della tensione di uscita sono rilevanti e sono principalmente dovute alle variazioni del SoC_{init} . In media, il SoC_{init} delle 6 celle è del 95% ma alcune celle presentano un SoC_{init} del 100%. La relazione non lineare fra la tensione di circuito aperto della singola cella ed il SoC è vicino al 100% causa il forte incremento nella deviazione standard della tensione di uscita.

Dopo 100 s tutte le celle hanno un SoC compreso fra il 20% ed il 90% ed in questa zona la tensione di uscita è indipendente dal SoC quindi la deviazione standard della tensione di uscita non è influenzata dalle variazioni del SoC_{init} , come si può vedere dalla Figura 36. In questo intervallo del SoC, la tensione di uscita del modulo è fortemente influenzata dall'OCV. Al contrario, il contributo degli altri parametri è trascurabile.

Alla fine della simulazione, dopo circa 2500 s, alcune celle entrano in una zona cosiddetta "scarica profonda" (il loro SoC è inferiore al 20%) conseguentemente la deviazione standard della tensione di uscita si incrementa. Questo è un aspetto critico per quanto riguarda le performance della batteria: in molti casi la tensione di uscita del modulo è inferiore ai 3,2 V nominali ed il carico connesso non verrebbe alimentato correttamente. La ragione principale di questo malfunzionamento è dovuta alla variabilità dell'OCV come si può vedere dalle Figure 36 e 40. Al contrario, la variabilità fra i SoC_{init} e fra le resistenze interne è poco rilevante come risulta dalle Figure 37 e 39. Le variazioni fra le capacità nominali delle celle diventano importanti alla fine della simulazione,

quando le celle con una capacità ridotta possono essere sovra-scaricate rispetto alle altre, come risulta da Figura 38.

Riassumendo, gli effetti delle variazioni dei diversi parametri sulle deviazioni standard della tensione di uscita del modulo sono diversi nelle varie fasi della scarica: le variazioni del SoC_{init} fra le varie celle è importante nella prima fase mentre le variazioni fra i valori di Q_{nom} sono rilevanti solo nella fase finale. Le variazioni delle OCV sono sempre molto rilevanti; al contrario, le variazioni delle resistenze interne portano variazioni della tensione di uscita trascurabili.

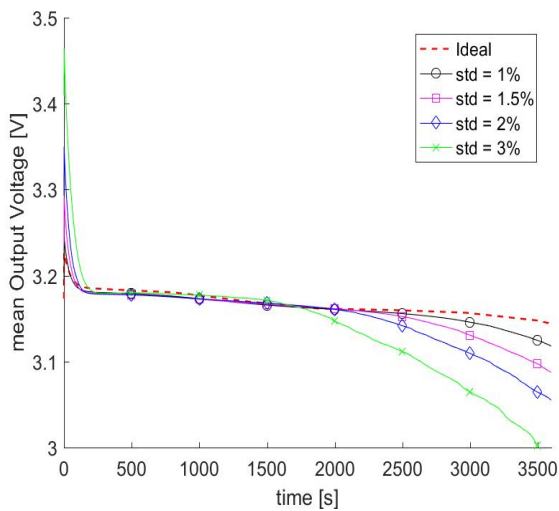


Figura 35: la tensione media del modulo durante la simulazione

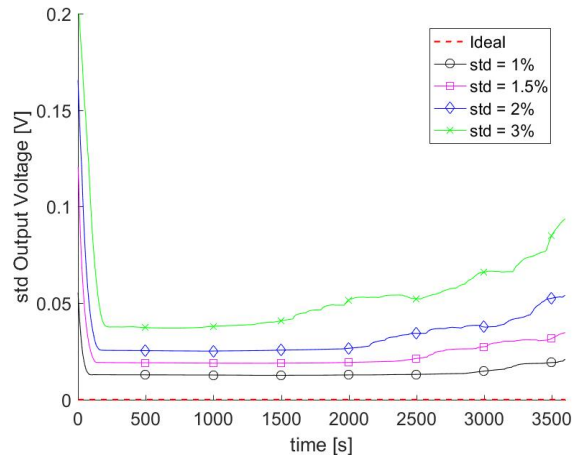


Figura 36: la deviazione standard della tensione del modulo durante la simulazione, considerando le variazioni statistiche di tutti i parametri delle 6 celle.

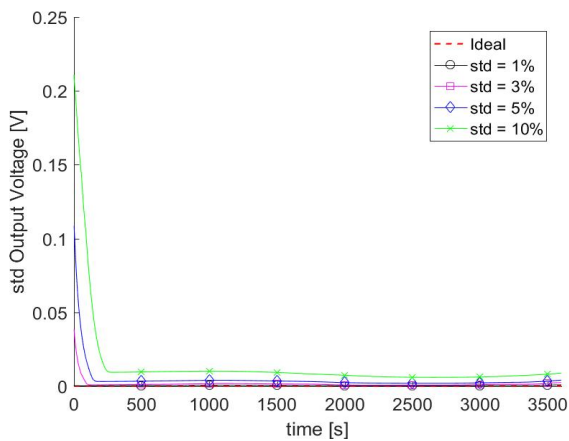


Figura 37: a deviazione standard della tensione del modulo durante la simulazione, considerando le variazioni statistiche del SoC iniziale delle 6 celle.

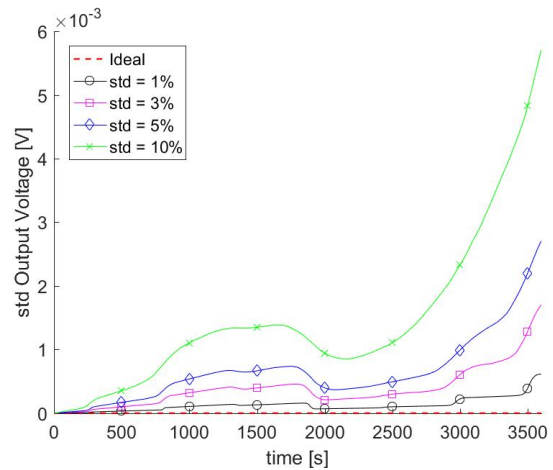


Figura 38: a deviazione standard della tensione del modulo durante la simulazione, considerando le variazioni statistiche delle capacità nominali delle 6 celle.

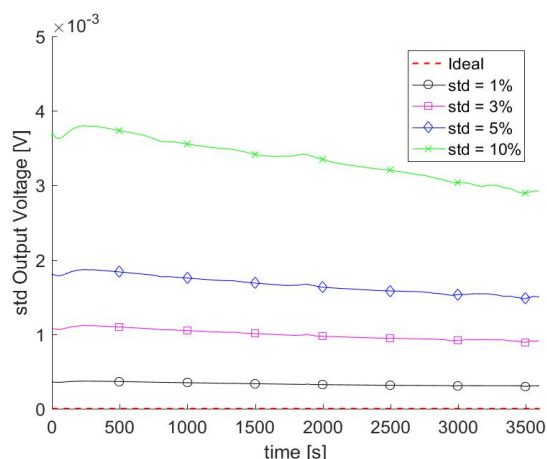


Figura 39: la deviazione standard della tensione del modulo durante la simulazione, considerando le variazioni statistiche delle resistenze interne delle 6 celle.

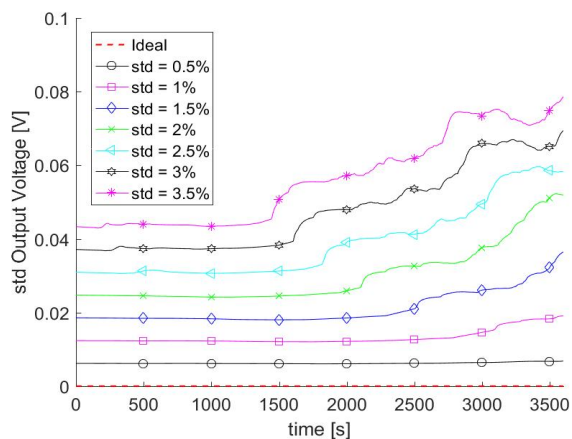


Figura 40: la deviazione standard della tensione del modulo durante la simulazione, considerando le variazioni statistiche delle OCV delle 6 celle.

Quanto fatto per l'analisi della tensione di uscita del modulo viene ripetuto anche per lo studio degli effetti delle variazioni dei parametri sul SoC. Figura 41 riporta il valor medio della deviazione standard del SoC delle 6 celle su 50 simulazioni considerando variazioni di tutti i parametri del modello elettrico con deviazioni standard dell'1%, 1,5%, 2% e 3%.

Le Figure 42-45 riportano gli stessi risultati considerando però variazioni dei singoli parametri: le variazioni del SoC_{init} (Figura 42), variazioni della capacità nominale della singola cella (Figura 43), variazioni delle resistenze interne (R_i , R_1 , R_2) (Figura 44), variazioni dell'OCV (Figura 45).

In Figura 42 si vede come le variazioni iniziali del 10% del SoC si decrementano rapidamente fino al 5%. La corrente delle celle con il SoC più alto è più intensa nella prima fase. Questo causa un rapido decremento del loro SoC.

Gli effetti delle variazioni della carica nominale Q_{nom} e delle resistenze interne della cella, come può essere visto nelle Figure 43 e 44, sono trascurabili nella fase iniziale, si incrementano durante la scarica ma sono comunque meno rilevanti rispetto agli effetti legati alle variazioni dell'OCV, come può essere visto in Figura 45.

Valori troppo alti della deviazione standard del SoC implica che alcune celle sono sovra-scaricate mentre altre si trovano in condizioni normali. Ciò causa una rapida degradazione delle celle "stressate" e conseguentemente una rapida riduzione dell'SoH e, di conseguenza, dell'intera batteria. Di conseguenza, la deviazione standard del SoC delle celle del modulo deve essere minimizzata e ciò può essere fatto riducendo la deviazione standard dell'OCV fra le celle. Al contrario, gli effetti degli altri parametri sono poco influenti.

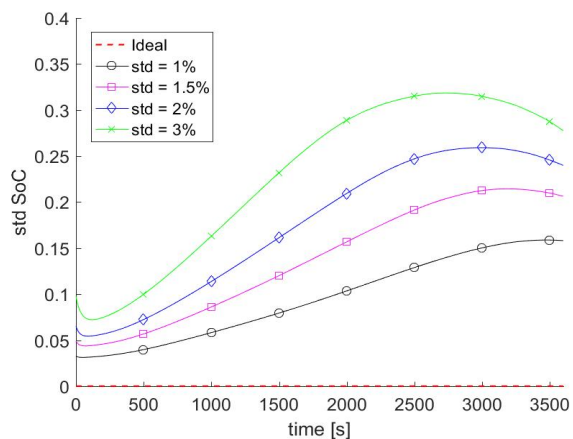


Figura 41: la media, su 50 simulazioni, della deviazione standard del SoC fra le 6 celle nel tempo, considerando le variazioni statistiche di tutti i parametri.

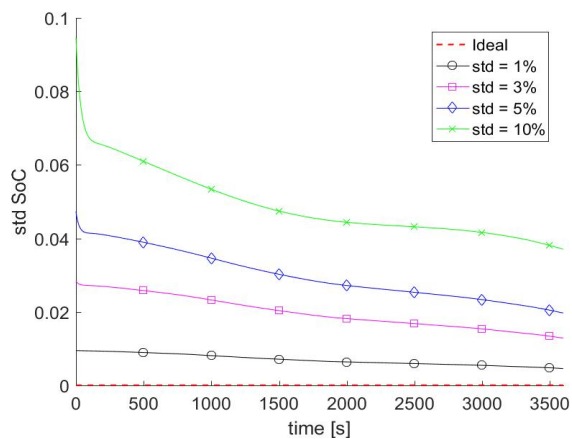


Figura 42: la media, su 50 simulazioni, della deviazione standard del SoC fra le 6 celle nel tempo, considerando le variazioni statistiche del SoC iniziale delle celle.

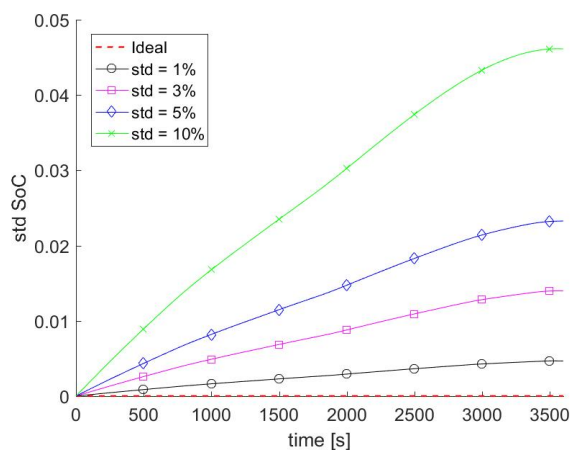


Figura 43: la media, su 50 simulazioni, della deviazione standard del SoC fra le 6 celle nel tempo, considerando le variazioni statistiche della capacità nominale delle celle.

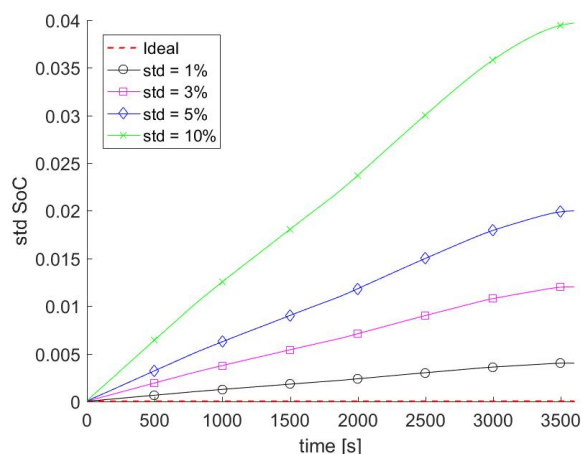


Figura 44: la media, su 50 simulazioni, della deviazione standard del SoC fra le 6 celle nel tempo, considerando le variazioni statistiche delle resistenze interne delle celle.

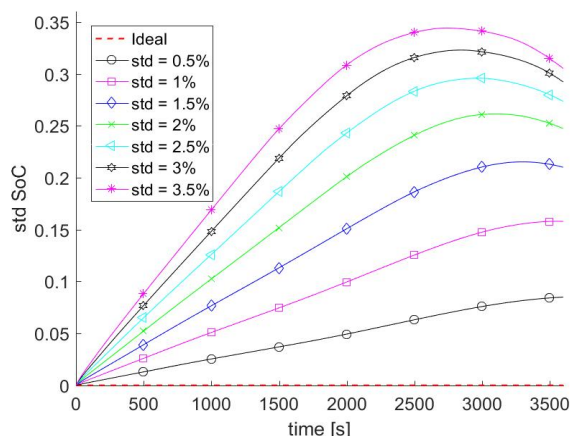


Figura 45: la media, su 50 simulazioni, della deviazione standard del SoC fra le 6 celle nel tempo, considerando le variazioni statistiche dell'OCV delle celle.

Figura 46 riporta il valore medio su 50 simulazioni della deviazione standard della corrente delle 6 celle nel tempo, considerando variazioni statistiche di tutti i parametri con deviazioni standard dell'1%, 1,5%, 2%, 3%.

Le Figure 47-50 mostrano gli stessi risultati considerando le variazioni dei singoli componenti del modello: variazioni del SoC_init (Figura 47), variazioni della capacità nominale (Q_{nom}) della singola cella (Figura 48), variazioni delle resistenze interne R_1 , R_1 , R_2 (Figura 49), variazioni dell'OCV (Figura 50).

In Figura 47 si nota come una variazione iniziale del SoC causa una notevole differenza fra le correnti delle varie celle. La corrente della cella con SoC più alto è più grande nella prima fase. Gli effetti della variazione del SoC_{init} decrescono rapidamente e sono trascurabili rispetto agli effetti della variazione dell'OCV mostrata in Figura 50.

Gli effetti della variazione della carica nominale delle celle Q_{nom} e delle resistenze interne, come può essere visto dalle Figure 48 e 49, è sempre trascurabile rispetto agli effetti delle variazioni dell'OCV riportati in Figura 50.

La deviazione standard della corrente in ogni cella dipende principalmente dalle variazioni dell'OCV e questa dipendenza è quasi costante durante tutta la fase della scarica.

Un valore alto della deviazione standard della corrente delle celle corrisponde al fatto che alcune celle potrebbero fornire più corrente di altre. Ciò causa un rapido decremento del SoC ed un alto surriscaldamento per effetto Joule delle celle coinvolte. Entrambi questi effetti possono essere dannosi per la vita della batteria e per la sicurezza del modulo.

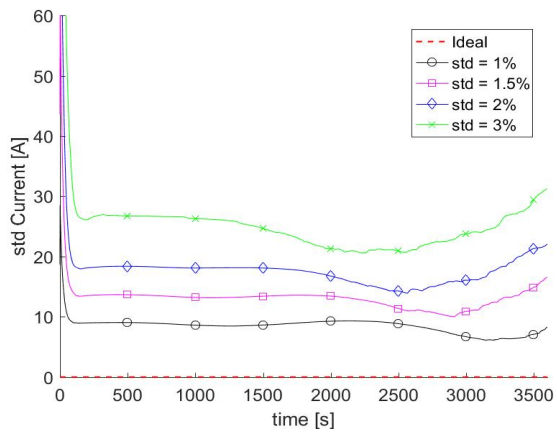


Figura 46: la media, su 50 simulazioni, della deviazione standard della corrente fra le 6 celle nel tempo, considerando le variazioni statistiche di tutti i parametri.

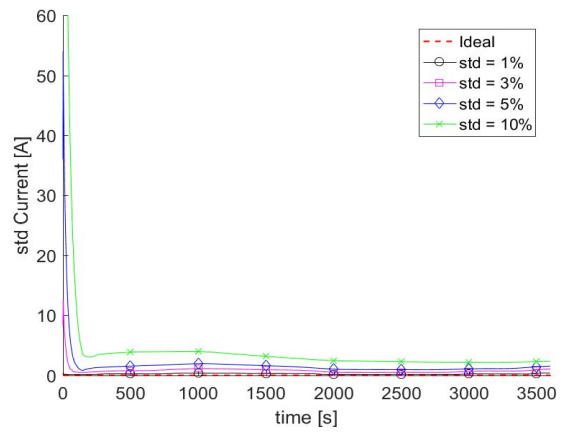


Figura 47: la media, su 50 simulazioni, della deviazione standard della corrente fra le 6 celle nel tempo, considerando le variazioni statistiche del SoC iniziale delle celle.

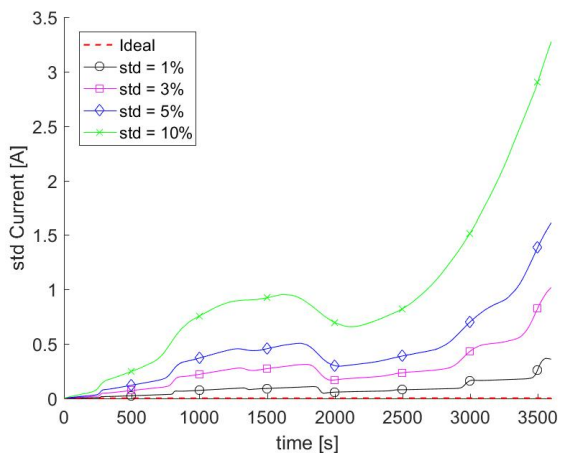


Figura 48: la media, su 50 simulazioni, della deviazione standard della corrente fra le 6 celle nel tempo, considerando le variazioni statistiche della capacità nominale delle celle.

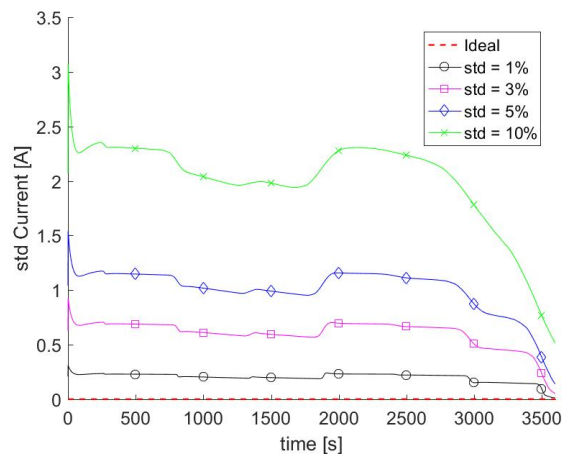


Figura 49: la media, su 50 simulazioni, della deviazione standard della corrente fra le 6 celle nel tempo, considerando le variazioni statistiche della resistenza interna delle celle.

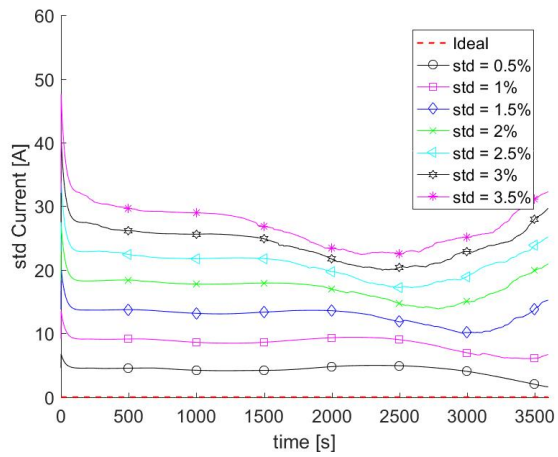


Figura 50: la media, su 50 simulazioni, della deviazione standard della corrente fra le 6 celle nel tempo, considerando le variazioni statistiche dell'OCV delle celle.

4 Piattaforma per lo sviluppo di algoritmi per BMS

Le batterie al litio possono essere composte da molte celle che, a causa di processi produttivi od in seguito a condizioni di lavoro differenti, possono avere valori dei parametri che caratterizzano il modello diversi da cella a cella. Nel paragrafo 3.4 si sono analizzati gli effetti che queste variazioni possono causare in un modulo composto da 6 celle connesse in parallelo. Il modulo viene limitato dalle celle meno prestazionali; in particolare, come si è visto in [22], piccole variazioni dell'OCV influiscono pesantemente nella durata del modulo in un ciclo di scarica.

Nelle batterie composte da celle connesse in serie, il BMS può compensare la differenza di OCV o di SoC intervenendo con tecniche di bilanciamento. Si parla di bilanciamento passivo quando l'energia viene trasferita dalle celle con il più alto SoC ad alcuni resistori che dissipano quest'energia in calore, si parla di bilanciamento attivo quando l'energia viene trasferita fra le celle che compongono la batteria con metodo più complesso [32]. A questo proposito diverse tecniche hardware ed algoritmi vengono continuamente proposte in letteratura [5], così come algoritmi per la stima del SoC e dell'SoH [28], [30].

Poiché i tempi per validare gli algoritmi dei BMS sono tutt'altro che trascurabili, spesso vengono utilizzate le simulazioni per ridurre le tempistiche di sviluppo degli algoritmi [17], [35]. D'altra parte gli algoritmi sviluppati devono essere validati anche sul sistema HW dell'applicazione poiché alcuni effetti collaterali, come ad esempio l'innalzamento della temperatura a bordo del BMS, possono essere effetti difficili sia da prevedere che da modellare.

In questo capitolo viene descritta una piattaforma HW/SW che consente di testare e validare gli algoritmi di bilanciamento utilizzando un sistema reale, flessibile ed open-source. La piattaforma è composta da un BMS, un caricabatterie, 6 celle al litio ed un PC che consente di gestire la validazione degli algoritmi e visualizzare il comportamento in real-time tramite un software scritto in MATLAB. Il BMS, essendo stato progettato come shield compatibile per Arduino UNO, ha la capacità di potersi connettere con diverse schede di sviluppo, fra cui schede con FPGA, consentendo di sperimentare diverse soluzioni. Il BMS proposto ha diversi ingressi ed uscite analogiche e digitali e permette la connessione in serie con altri BMS identici permettendo di sperimentare su batterie ad alta tensione. Alcune piattaforme sono già state proposte, ma mentre in [41] la piattaforma non è espandibile e non è possibile connettere diversi BMS in serie, rispetto a [55], questo lavoro focalizza l'attenzione sull'ottimizzazione degli algoritmi di bilanciamento passivo e consente di controllare l'intera piattaforma (BMS e caricabatteria) consentendo agli algoritmi di bilanciamento di interagire con gli algoritmi di carica.

La piattaforma consente di simulare e validare una batteria al litio utilizzando gli stessi algoritmi sia nella simulazione che nel controllo reale dell'hardware.

4.1 L'architettura della piattaforma di HW/SW

In questo paragrafo vengono descritti i componenti della piattaforma hardware e software composta da un BMS a sei celle denominato “BMSino”, un generatore di corrente controllabile che funge da caricabatterie ed un PC con il software di gestione della piattaforma sviluppato in MATLAB. Il software consente sia di controllare la strumentazione che di monitorare in real-time le varie grandezze di interesse fra cui la tensione e la temperatura delle singole celle, lo stato del bilanciamento, la corrente in ingresso/uscita della batteria e la temperatura della scheda BMS (la temperatura nei pressi delle resistenze di bilanciamento). Ciò permette di sviluppare algoritmi di gestione del bilanciamento e di carica della batteria con elevata rapidità, potendo utilizzare tecniche di programmazione ad alto livello. La strumentazione hardware¹ ed il software² è completamente open-source e può essere controllata da un PC esterno, tramite la porta USB ed interfaccia seriale, o può lavorare come dispositivo autonomo per test e validazioni sul campo, memorizzando le necessarie informazioni su una SD-card utilizzando una delle varie espansioni disponibili. L'intera piattaforma è modulare ed espandibile, ad esempio aggiungendo un carico attivo controllabile da PC, che consentirà di sviluppare e validare algoritmi di gestione della batteria anche durante le fasi di scarica. Inoltre, il BMS, consente di controllare diversi relè, ventilatori, ecc utilizzando le uscite di potenza della scheda supplementari o di monitorare diverse grandezze usando gli input analogici e digitali. Figura 51 riporta lo schema a blocchi della piattaforma.

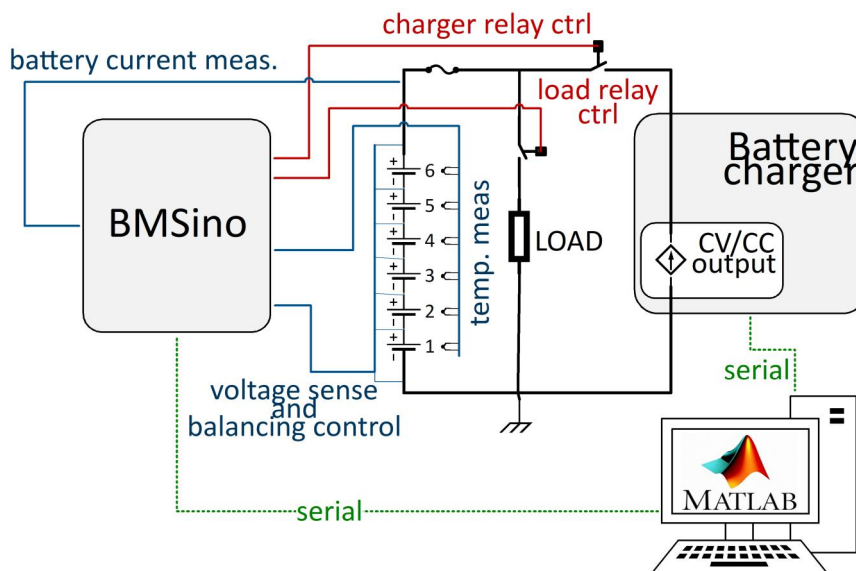


Figura 51: Lo schema a blocchi della piattaforma HW/SW basata su “BMSino”

4.1.1 Il Battery Management System

Il battery management system per batterie a li litio deve assicurare che le batterie lavorino in condizioni di sicurezza per cui è strettamente necessario il monitoraggio delle tensioni e delle

1 <https://circuitmaker.com/Projects/Details/Erwins-Fluffy/BMSino>

2 <https://github.com/Lucast85/BMSino-Matlab-test>

temperature di tutte le celle e la misurazione della corrente di batteria [ref1]. Inoltre, per poter sfruttare l'intera capacità delle celle che compongono la batteria, è necessario un metodo di bilanciamento [5]. Sebbene non sia un tecnica di bilanciamento efficiente, si è voluto utilizzare un sistema di bilanciamento passivo perché è il più diffuso essendo il metodo più economico e più sicuro fra i le varie tecniche presenti allo stato dell'arte [56]. Attualmente varie tecniche devono essere sviluppate ed ottimizzate per minimizzare le perdite di energia (i tempi di attivazione dei vari mosfet di bilanciamento) velocizzando così anche le fasi di carica.

Il BMS è stato progettato in modo da poter disporre di diversi bus di comunicazione per scambiare dati con dispositivi esterni come il caricabatterie, inverter, ecc. oppure per memorizzare dati su SD-CARD o ancora per poter monitorare in real-time lo stato delle varie celle.

Il BMS è una expansion-board per le schede a microcontrollore più comuni essendo compatibile con il pinout delle schede basate su Arduino-UNO, fra cui vale la pena menzionare le schede provviste di FPGA che consentono di ottenere prestazioni elevate in caso di calcoli complessi come ad esempio può essere la stima del SoC o dell'SoH [57].

Durante la fase di validazione e test, il BMS è stato controllato da un Arduino-UNO per cui, in Figura 51, il blocco indicato con "BMSino" è composto da un BMS e da una scheda Arduino-UNO. I prossimi paragrafi descrivono in dettaglio i vari blocchi HW di cui è composto BMSino, rappresentati in Figura 52. Figura 55 mostra l'intera piattaforma durante i test di validazione.

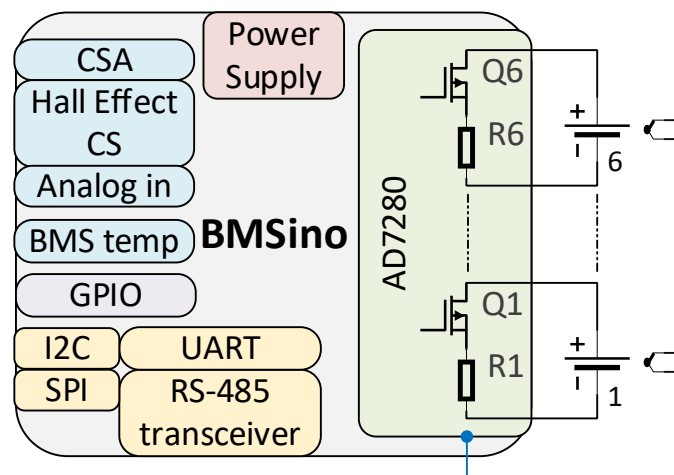


Figura 52: lo schema a blocchi di BMSino: una shield BSM basata sul circuito integrato AD7280 dell'Analog Device

Il circuito integrato del BMS

Per il monitoraggio delle tensioni e delle temperature delle 6 celle è stato utilizzato un circuito integrato, l'AD7280, progettato dalla Analog Devices . La risoluzione di misura della tensione è di 976 uV nel range [1-5]V per le tensioni delle celle e 1,22 mV nel range [0-5] V per la misura delle temperature delle celle mentre la frequenza di campionamento massima è di 11,6 kHz. L'AD7280 controlla anche i gate dei mosfet utilizzati come interruttori per connettere le celle a dei resistori di potenza (10 Ω , 2 W) durante il ciclo di carica in modo da scaricare le celle eccessivamente cariche.

Tecniche di misura della corrente

Il BMS è stato predisposto per utilizzare tre differenti tipi di misura della corrente di batteria, a seconda dell'intensità di corrente in gioco. Tutte le tecniche sono basate sugli ingressi analogici della scheda a microcontrollore utilizzata. Nel caso in cui la scheda sia un Arduino Uno, il range di tensione in ingresso misurabile è circa [0-5] V mentre la risoluzione è di 10 bit. Per elevate correnti, nell'ordine di decine o centinaia di Ampere, la shield può montare un sensore ad effetto hall ad anello aperto della famiglia "HAIS" del produttore "LEM", come ad esempio un HAIS 50-P che ha un range in ingresso di ± 150 A che si traduce in una risoluzione, in corrente di 0,39 A. Quando la corrente in gioco è bassa si può utilizzare un current sense amplifier (CSA), precisamente l'INA170 prodotto dalla Texas Instruments per monitorare la tensione ai capi di una resistenza di shunt di 0,22 Ω . Il range misurabile è $\pm 11,3$ A con una risoluzione pari a 22,2 mA. L'ultima opzione è quella di misurare la corrente utilizzando sensori esterni connessi con gli ingressi analogici della scheda a microcontrollore. La risoluzione e l'accuratezza dipenderà dal sensore utilizzato.

I sensori di temperatura

Durante gli istanti in cui le celle vengono bilanciate le temperature dei resistori di bilanciamento si incrementano rapidamente per cui un termistore NTC da 10 k Ω è stato posizionato al centro del gruppo dei sei resistori per monitorare la temperatura della parte più calda della scheda.

Comunicazione

Nella shield sono stati previste diverse interfacce di comunicazione. Un bus SPI ed una linea GPIO sono disponibili per il controllo di dispositivi SPI esterni come le SD-CARD che permettono di memorizzare le informazioni della batteria su un supporto fisico. Un bus UART consente di condividere le informazioni della batteria con un PC utilizzando la linea seriale standard di Arduino. Tramite la connessione USB di Arduino, infatti, è possibile controllare lo stato dei mosfet di bilanciamento e leggere le misure di tensioni e temperature delle celle così come la corrente della batteria. Lo stesso bus UART potrebbe essere utilizzata per comunicare tramite un bus RS-485 differenziale montando un transceiver opzionale. Infine, un transceiver I2C isolato consente di connettere in serie diverse schede BMSino in modo da poter sviluppare su batterie ad alta tensione.

Ingressi ed uscite generiche

La shield ha diversi ingressi ed uscite da poter essere utilizzate per scopi generici. In particolare ci sono due ingressi analogici con filtri anti-aliasing, due ingressi digitali e due uscite di potenza "low-side" che consentono di controllare carichi induttivi (es. i relè) con tensioni massime di 50 V e correnti massime di 2,5A.

Alimentazione

BMSino può essere alimentato in due diversi modi: dalla shield durante la programmazione, durante il debug o i test, oppure direttamente dalle celle in modo che la batteria possa operare autonomamente senza la necessità di essere connessa ad un PC. A un pin apposito viene collegato con la tensione positiva della batteria, la shield, grazie al DC/DC converter integrato, alimenta la scheda a microcontrollore.

Firmware

Dato che la shield può essere montata su qualsiasi scheda compatibile con il pinout di Arduino-UNO, il firmware può essere personalizzato dallo sviluppatore. Nelle sperimentazioni condotte è

stato scritto un firmware compatibile con il linguaggio di Arduino che fornisce le primitive di comunicazione seriale fra BSMino ed un qualsiasi dispositivo provvisto di porta seriale. Lo scopo principale del FW sviluppato è quello di fornire un layer software il BMS ad un PC che gestisce la simulazione tramite un software che contiene anche gli algoritmi che devono essere validati.

Il firmware per Arduino è stato sviluppato in C++, definendo una classe di oggetti per ogni blocco rappresentato in Figura 52. Pertanto, per definire ogni oggetto fisicamente connesso al BMS come un NTC specifico od un sensore di corrente, è sufficiente definire un'istanza della classe relativa che contiene le caratteristiche dell'oggetto (ad es. look-up-tables per gli NTC o fattori di proporzionalità I/V per i sensori di corrente, ecc). Il firmware contiene tutte le funzionalità di sicurezza interne. Nel loop principale vengono monitorate continuamente la tensione delle celle, la temperatura, la corrente della batteria e la temperatura della shield con un periodo di 14 ms. Se anche solo uno di questi parametri oltrepassa il valore del limite di sicurezza definito, il BMS ferma la carica ed apre tutti i mosfet di bilanciamento lasciando ogni cella disconnessa dal carico. Mentre il BMS controlla lo stato delle celle, esso può essere interrogato riguardo attraverso la porta seriale tramite semplici comandi tra cui quello per la lettura delle tensioni delle celle, per la lettura della temperatura delle celle e del BMS, per la lettura della corrente di batterie. Inoltre tramite altri comandi è possibile impostare e leggere lo stato dei mosfet di bilanciamento.

4.1.2 Il caricabatterie

Il caricabatterie è un DC/DC converter commerciale basato sul regolatore step-down LM2596 della Texas Instruments. La tensione massima consentita in ingresso è 40 V mentre l'uscita è regolabile nel range [0,01 – 35]V con una corrente massima di 3 A. Il regolatore è controllabile tramite una porta seriale e può operare in modalità corrente-costante con una risoluzione di 1 mA, o in modalità tensione-costante con una risoluzione di 10 mV. E' possibile, altresì, abilitare o disabilitare l'uscita ed auto-calibrare lo strumento.

4.1.3 Il software di gestione e monitoraggio della piattaforma

Il software di gestione della piattaforma è stato scritto in MATLAB utilizzando i paradigmi della programmazione ad oggetti. Il test, come mostra Figura 52, è controllato da un timer che esegue quattro task differenti: lo "start task", che inizializza il timer e crea gli oggetti "charger" e "battery"; il "tick_task" che contiene il codice di controllo principale della piattaforma e visualizza i dati in real-time; "l'error task" e "l'end-task" che contengono rispettivamente il codice che gestisce gli errori ed il codice che ferma il test ed effettua il salvataggio dati. Il diagramma di flusso del test viene mostrato in Figura 54. Dopo una fase iniziale dove sono eseguite tutte le misure, ossia tensioni e temperature delle celle, corrente di batteria e temperatura del BMS, viene eseguito un controllo di sicurezza per verificare che le misurazioni siano entro dei range prestabiliti. Inseguito viene calcolata la maschera di bilanciamento, ossia vengono individuate le celle che devono essere scaricate secondo il seguente metodo: se la tensione dell'n-esima cella è maggiore del parametro "*start of balancing voltage*", indicato nella Tabella 6, allora, se la tensione misurata è sufficientemente vicina alla tensione della cella più alta, a meno di un fattore "*End of charge delta voltage*", allora la cella viene bilanciata, altrimenti non viene bilanciata. L'algoritmo per il calcolo del setpoint di corrente di carica agisce secondo una logica corrente costante-tensione costante: se la cella a tensione più alta ha una tensione inferiore al parametro "*Reduction of charge set-point*"

allora la corrente impostata è la massima consentita, pari a “*Max charging current*” altrimenti, il set-point di carica dipende linearmente dalla differenza fra la cella a tensione più elevata ed il parametro “End of charging voltage” ossia la corrente di carica decresce al crescere della tensione della cella più carica.

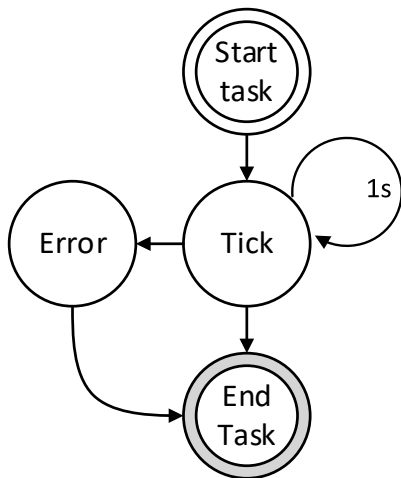


Figura 53: il diagramma di flusso dell' algoritmo di test sviluppato in MATLAB

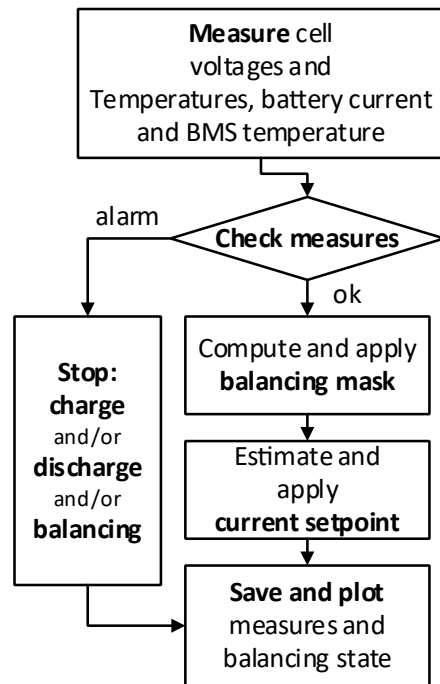


Figura 54: Il diagramma di flusso del "tick task"

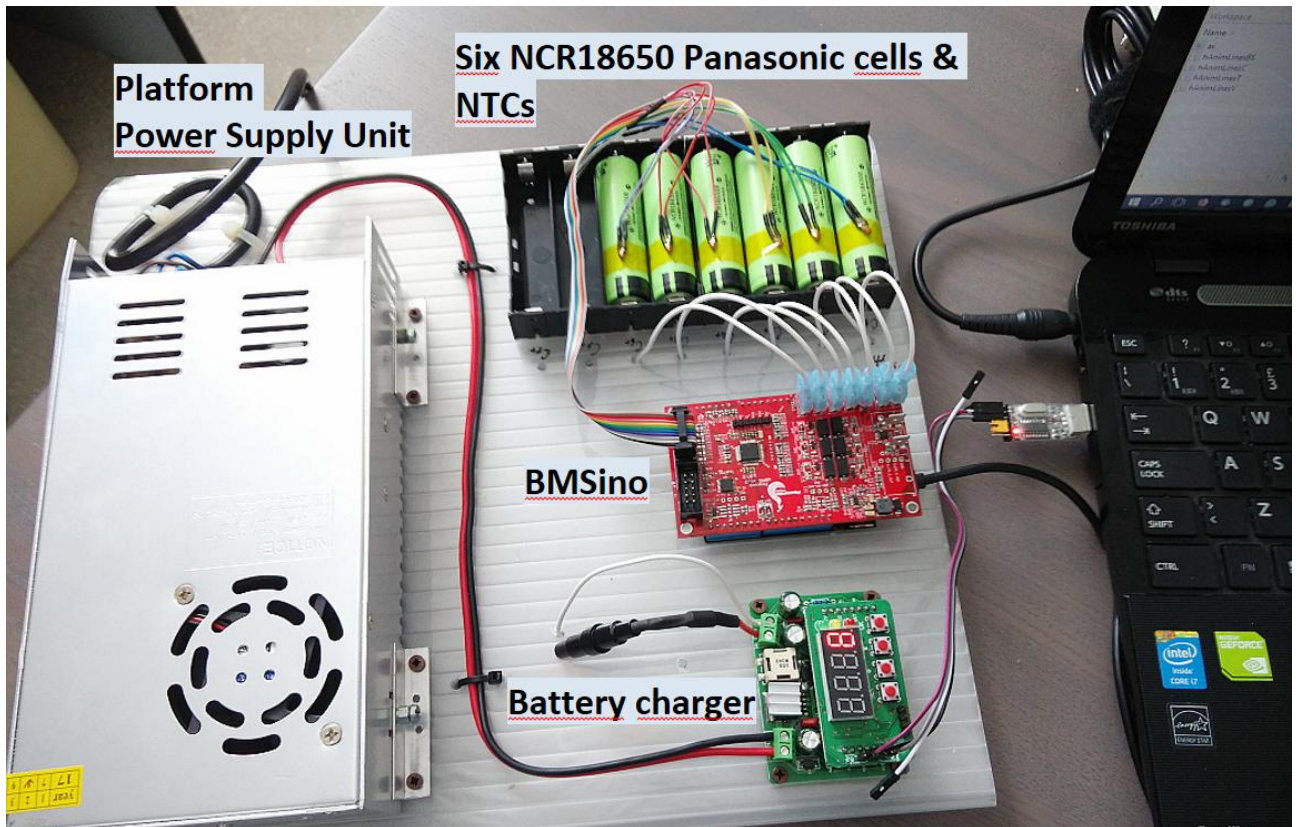


Figura 55: La piattaforma di test composta da BMSino, un caricabatterie, le celle al litio ed un alimentatore

4.2 Validazione della piattaforma

La piattaforma è stata validata utilizzando il setup mostrato nelle Figure 51 e 55 durante la carica. Sono state utilizzate sei celle al litio NCR18650 della Panasonic connesse in serie le cui caratteristiche principali sono elencate nella Tabella 6 insieme ai parametri utilizzati durante il test.

Tabella 6: Le caratteristiche delle celle al litio ed i set-point utilizzati durante la validazione della piattaforma.

Nominal voltage	3.6 V
Discharging end voltage / End of charging voltage	2.5 V / 4.2V
Rated capacity	3200 mAh
Max charging current	1.5 A
Start of balancing voltage	4.0 V
End of charge delta voltage	0.03 V
Reduction of charge set-point	4.0 V
Max. PCB temperature	+75 °C

In Figura 56 vengono mostrate le tensioni delle sei celle durante il test e la corrente di batteria durante il ciclo di carica. Il test è stato eseguito utilizzando celle non bilanciate. La tensione OCV della cella più scarica è di 3,51 V mentre la tensione di circuito aperto della cella più carica è di 3,74 V. Seguendo l'algoritmo mostrato nella Figura 54, il caricabatterie è impostato sul valore di corrente massimo ammissibile di 1,5 A (*Max charging current*). Questo set-point rimane invariato finché la cella a tensione massima raggiunge la tensione di 4 V (*Start of balancing voltage*), dopodiché i mosfet di bilanciamento iniziano a commutare, come mostrato dal grafico in Figura 57 e la zona di PCB dove sono montati i resistori di bilanciamento raggiungono velocemente la massima temperatura ammissibile (Figura 58). Nello stesso istante di tempo la corrente di carica inizia a decrescere linearmente seguendo la velocità di crescita della cella a tensione massima fino al termine della carica, cioè quando la differenza fra la cella a tensione massima che ha raggiunto la tensione "*End of charging voltage*" e la cella a tensione minima è inferiore o uguale a "*End of charge delta voltage*". Negli ultimi istanti di carica si nota come la temperatura del BMS raggiunge la temperatura massima consentita ed i mosfet vengono commutati meno frequentemente per consentire alla scheda di raffreddarsi.

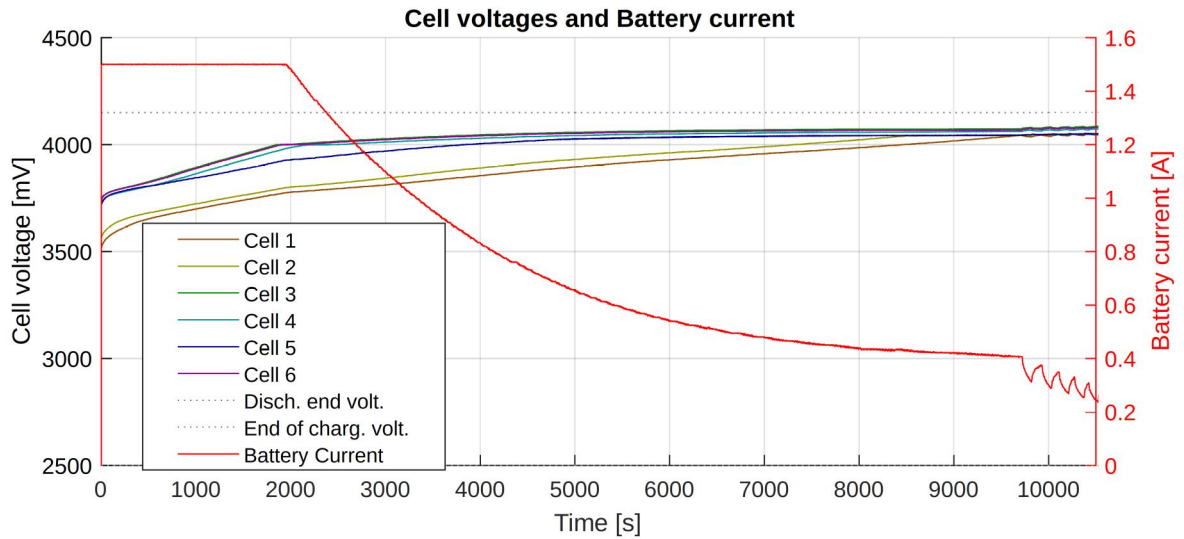


Figura 56: la tensione delle sei celle durante il test di carica e bilanciamento.

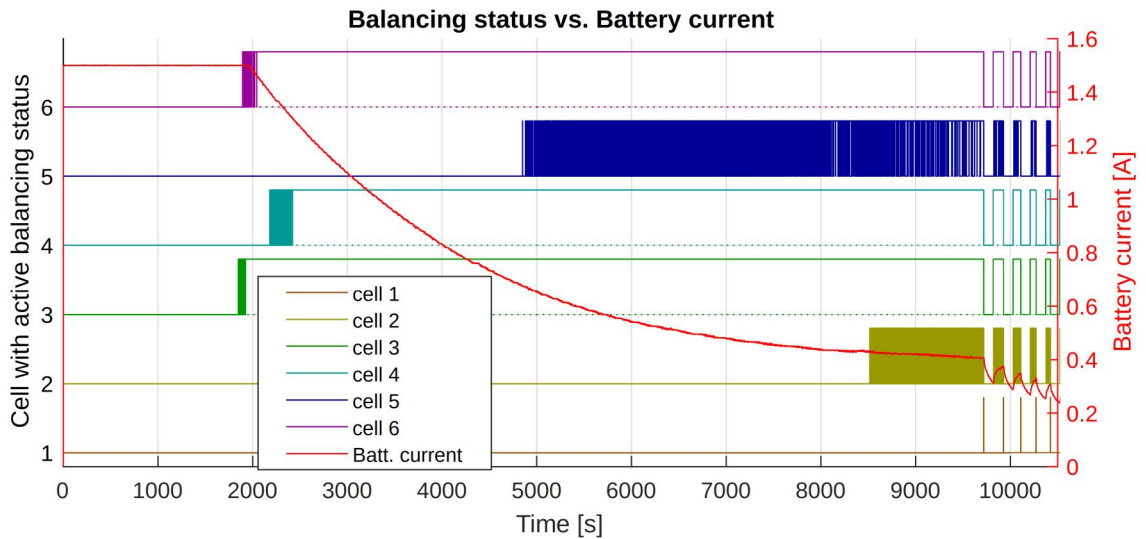


Figura 57: lo stato dei mosfet di bilanciamento durante il test di validazione della piattaforma. Un segnale a livello logico alto indica che la cella relativa si sta bilanciando.

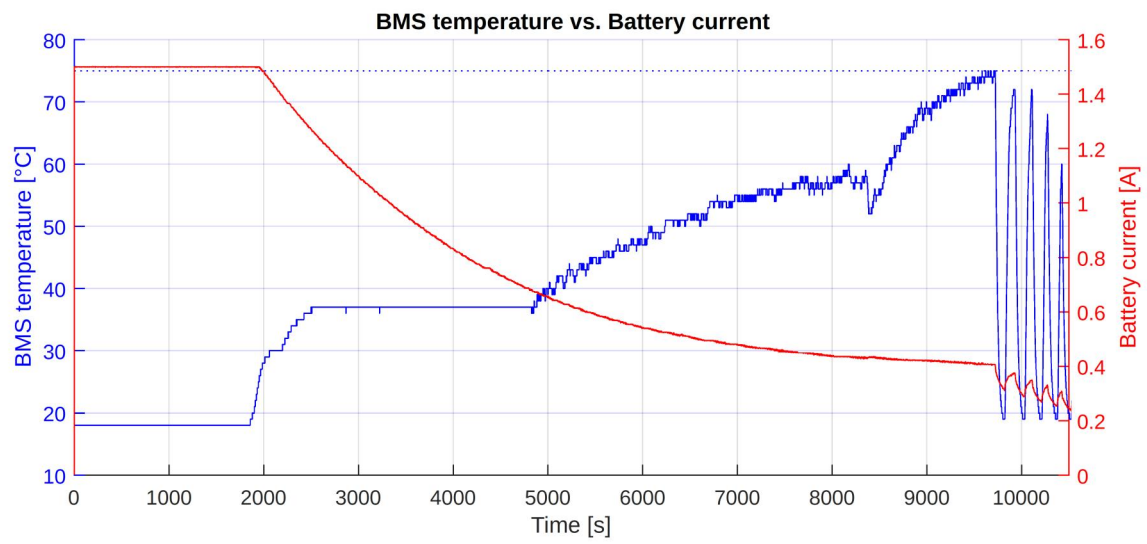


Figura 58: la temperatura del BMS durante la validazione.

4.3 L'utilizzo della piattaforma per il confronto degli algoritmi di bilanciamento e carica

Il software, realizzato in MATLAB, invia i dati dal PC verso il BMS che acquisisce le misure. Il "tick task", rappresentato nelle Figure 53 e 54, contiene la logica di gestione della batterie e consiste in un loop che viene eseguito una volta al secondo, seguendo gli step elencati di seguito:

1. **Misura:** Viene salvato l'istante di tempo attuale, vengono interdetti gli eventuali mosfet di bilanciamento attivi interrompendo così il bilanciamento su tutte le celle e vengono misurate le tensioni delle sei celle, le temperature e, la corrente di batteria e la temperatura del BMS.
2. **Controllo di sicurezza:** le misure effettuate allo step 1 vengono confrontate con delle soglie di sicurezza. Per ogni soglia di sicurezza che è stata oltrepassata viene settato un flag, la corrente di carica ed i bilanciamenti vengono interrotti in modo che la corrente in ingresso od uscita dalle celle sia nulla. Infine viene lanciato un errore ed il test viene fermato.
3. **Algoritmo di bilanciamento:** Viene eseguito l'algoritmo di bilanciamento per decidere quali celle occorre bilanciare (viene applicata la "balancing mask").
4. **Algoritmo di carica:** Viene eseguito l'algoritmo di carica per il calcolo del set-point di corrente. Si esce dal test se la carica è considerata completa.
5. **Pausa:** si attende che sia trascorso un secondo dall'inizio del loop prima che si ricominci dallo step 1. Nel frattempo vengono aggiornati i log e vengono aggiornati gli andamenti delle misure sui grafici.

Con l'aiuto della piattaforma descritta al paragrafo 4.1 vengono valutati due algoritmi differenti:

Algoritmo A

Viene calcolato il valor medio della tensione della singola cella considerando gli 8 campioni precedenti.

1. Se tutte le celle sono al di sotto della soglia di bilanciamento (V_{th}), la corrente di carica è impostata al massimo valore (I_{MAX}). Il bilanciamento non viene attivato.
2. Quando la tensione massima di una cella è al di sopra della soglia di bilanciamento V_{th} , il relativo bilanciamento viene attivato. La corrente di carica viene impostata seguendo le equazioni (25)-(27).
3. Il bilanciamento è applicato ad ogni cella per la quale $V_i > V_{imax} - V_{th2}$

$$I_{charge} = I_{MAX} \left[1 - \left(\frac{V_{imax} - V_{th}}{V_{MAX} - V_{th}} \right)^2 \right] \quad (25)$$

$$V_{imax} = \max_{1..n} V_i \quad (26)$$

$$I_{i,balance} = \frac{V_i}{R_{balance}} \quad (27)$$

4. Il bilanciamento termina quando le celle sono state bilanciate almeno una volta. La carica continua abbassando la corrente seguendo l'equazione 25. Il bilanciamento non viene più attivato per 100 s.
5. Dopo 100 s, un altro ciclo di bilanciamento può essere eseguito ricominciando dallo step 3.
6. La fase di bilanciamento continua in maniera alternata ad intervalli di 100s finché almeno una cella raggiunge la tensione massima consentita V_{MAX} .

Algoritmo B

Viene calcolato il valor medio della tensione della singola cella considerando gli 8 campioni precedenti.

1. Se tutte le celle sono al di sotto della soglia di bilanciamento (V_{th}), la corrente di carica è impostata al massimo valore (I_{MAX}). Il bilanciamento non viene attivato.
2. Quando la tensione massima di una cella è al di sopra della soglia di bilanciamento V_{th} , il relativo bilanciamento viene attivato. La corrente di carica viene impostata seguendo le equazioni (25)-(27).
3. Il bilanciamento è applicato ad ogni cella per la quale $V_i > V_{imax} - V_{th2}$.
4. La fase di bilanciamento continua finché almeno una cella raggiunge la tensione massima consentita V_{MAX} .

La Tabella 7 riporta i valore dei parametri che sono stati usati durante gli esperimenti:

Tabella 7: I parametri utilizzati durante il test per il confronto fra gli algoritmi A e B

V_{th}	4 V
V_{th2}	5 mV
V_{MAX}	4,2 V
I_{MAX}	1,6 A
$R_{balance}$	10 Ω

Risultati del confronto

I test per il confronto dei due algoritmi sono stati condotti utilizzando sei nuove celle al litio NCR18650 prodotte dalla Panasonic e sei celle usate UCR18650F prodotte dalla Sanyo. Le caratteristiche principali sono riportate in Tabella 8.

Tabella 8: le caratteristiche delle celle al litio utilizzate per il test

	Panasonic NCR18650	Sanyo UCR18650F
Tensione nominale	3,6 V	3,7 V
Tensione di fine scarica/carica	2,5/4,2 V	2,75/4,2 V
Capacità nominale	3200 mAh	2500 mAh
Corrente massima di carica	1,65 A	1,75 A

Per il confronto fra i due algoritmi, in fase di sviluppo della piattaforma, sono stati eseguiti diversi test. I risultati sono riportati nelle Figure 59-68 e la sintesi delle prestazioni è riassunta nella Tabella 9. Le figure 59-64 mostrano i risultati del test 4 indicato in Tabella 9, dove è stato applicato l'algoritmo A. Le celle hanno inizialmente uno stato di carica del 50% circa mentre la differenza fra i SoC è bassa per cui la carica è bilanciata equamente nella batteria ed il mismatch fra i parametri delle celle è poco rilevante (solo la cella 5 mostra una resistenza interna più alta rispetto alle altre celle). Figura 59 mostra i valori delle tensioni delle celle durante la carica del test 4. Nei primi 180 s le celle si stanno tutte caricando ma alcune di esse hanno i mosfet di bilanciamento attivi per cui parte della corrente di carica (circa 0,4 A) scorre nei resistori da 10 Ω connessi in parallelo alla cella. La Figura 60 mostra lo stato dei bilanciamenti. La cella 4 ha la tensione più bassa per cui non viene mai bilanciata. Al contrario, la cella 1, avendo la tensione più alta, viene continuamente bilanciata. Dopo circa 180 s la cella 4 aumenta la sua tensione rispetto le altre celle ed il bilanciamento viene applicato anche ad essa. Dopo questo istante l'algoritmo A termina il bilanciamento e tutte le celle vengono caricate. La differenza fra le tensioni delle celle però si va ad incrementare a causa delle inevitabili differenze fra i parametri delle celle e fra le loro condizioni operative. Dopo 100 s l'algoritmo A inizia una nuova fase di bilanciamento riducendo di nuovo la differenza fra le tensioni delle varie celle. Figura 61 mostra gli effetti dell'algoritmo di bilanciamento sulla massima differenza di tensione fra le celle dv . Durante il bilanciamento dv si riduce rapidamente. Tuttavia, l'energia immagazzinata dalle celle a tensione più alta viene dissipata dai resistori di bilanciamento che scaldano rapidamente anche il PCB del BMS. Il periodo di riposo in cui il bilanciamento viene sospeso aiuta a mantenere la temperatura massima della scheda sotto controllo ed a contenere anche la temperatura media, come mostrato in Figura 62. Figura 63 mostra la corrente di carica durante il test 4; il suo valore viene imposto dal BMS seguendo le regole imposte dall'equazione 25. Si nota come la corrente iniziale sia quella massima pari 1,65 A e poi si riduce via via che la tensione massima fra le sei celle si incrementa.

In fig7 viene riportata l'efficienza in termini di potenza durante il test, definita come:

$$\eta_p = \frac{P_{sup} - P_{int} - P_{bal}}{P_{sup}} \quad (28)$$

Dove P_{sup} è la potenza fornita dal caricabatteria, P_{int} è la potenza dissipata dalla resistenza interna delle celle, P_{bal} è la potenza dissipata dai resistori di bilanciamento. Durante il periodo in cui non si sta bilanciando, l'inefficienza è dovuta solo alle resistenze interne P_{int} che decresce quando la corrente di carica diminuisce, ossia a fine carica. Durante il bilanciamento l'efficienza diminuisce in

particolare quando molte celle hanno il bilanciamento attivo. Il periodo di pausa da bilanciamento va quindi ad incrementare l'efficienza media in termini di potenza.

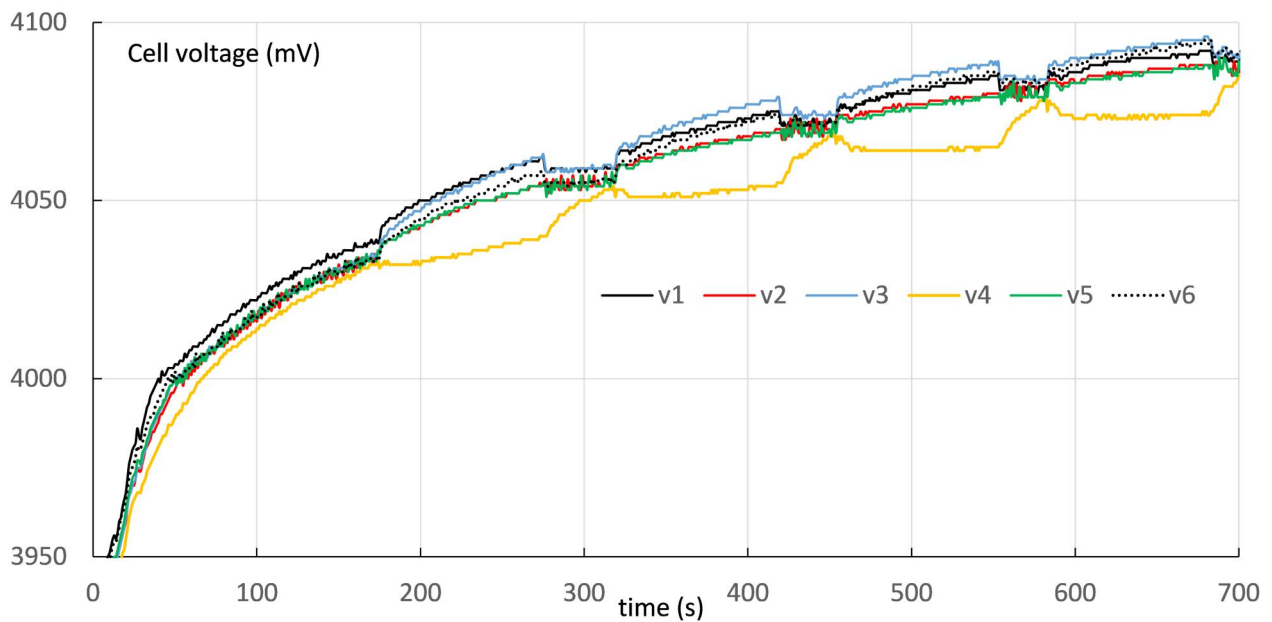


Figura 59: Le tensioni delle 6 celle durante il test 4 condotto utilizzando l'algoritmo A.

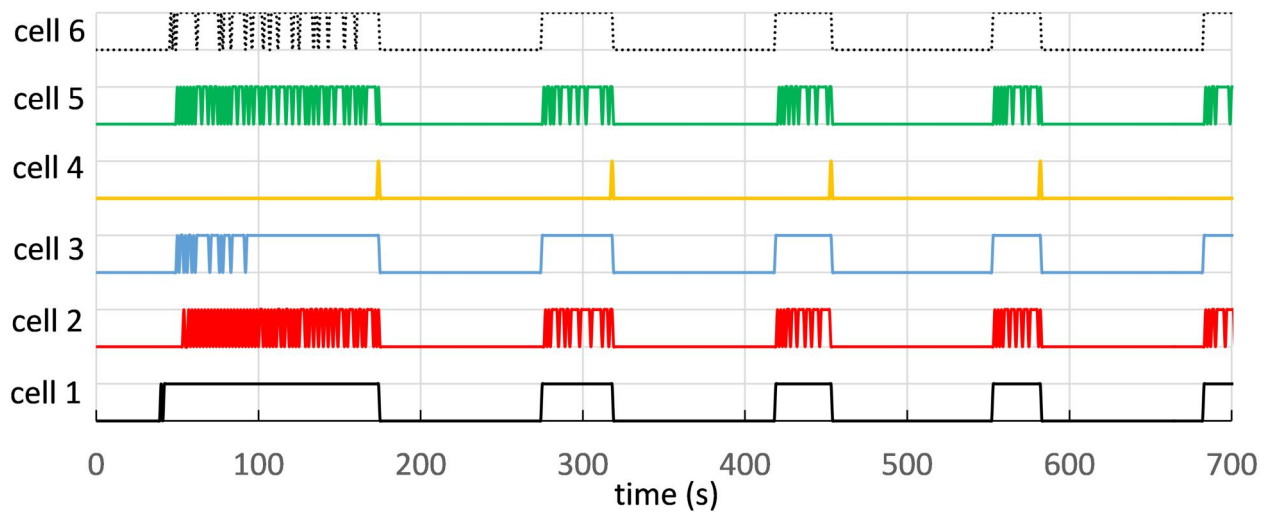


Figura 60: I segnali di controllo dei bilanciamenti delle 6 celle (1:on, 0:off) durante il test 4.

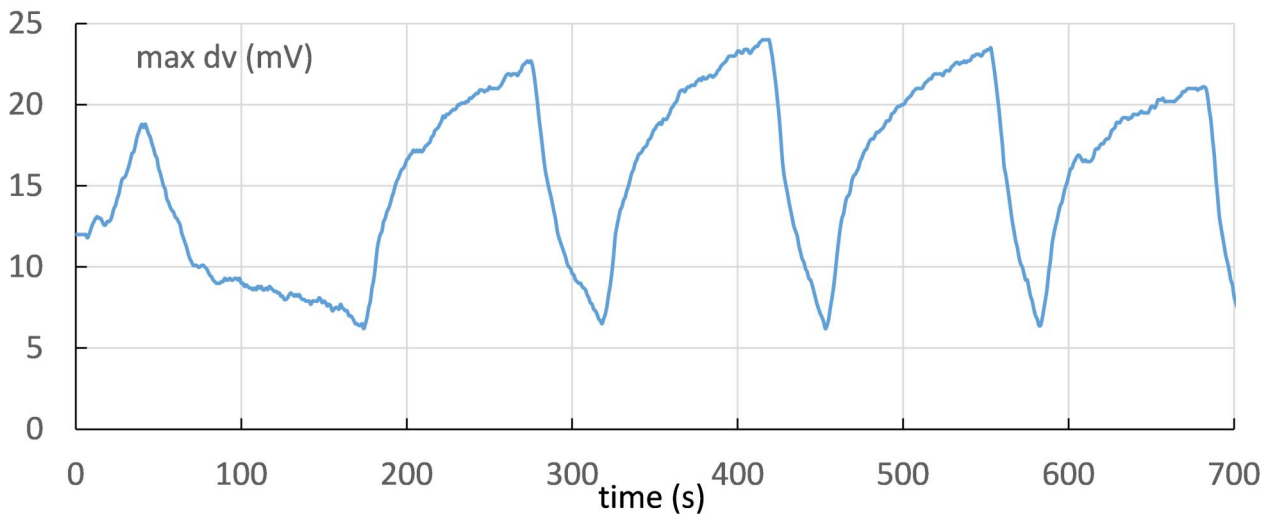


Figura 61: la massima differenza di tensione dV fra le celle durante il ciclo di carica del test 4.

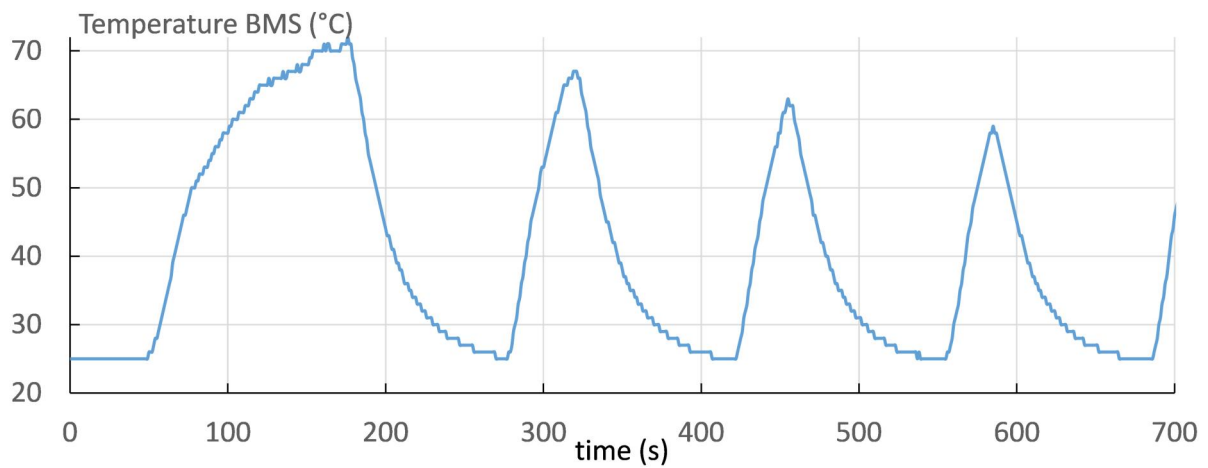


Figura 62: La temperatura del BMS durante la carica del test 4.

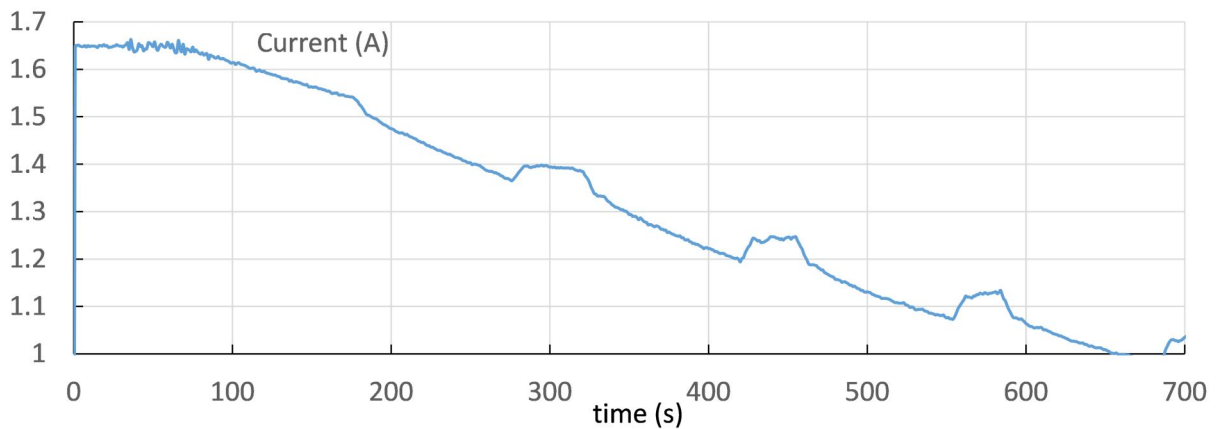


Figura 63: La corrente fornita dal caricabatteria durante il test 4.

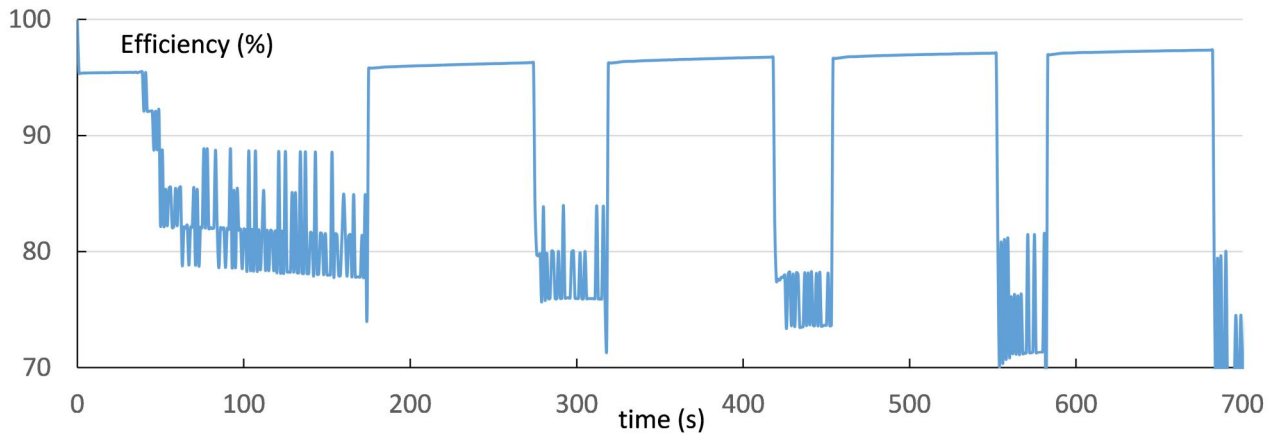


Figura 64: L'efficienza in termini di potenza durante la carica del test 4.

Come confronto, le Figure 65-68 riportano i risultati del test 2 nel quale viene applicato l'algoritmo B durante la fase di carica. Le celle hanno un SoC iniziale del 33% circa per cui la durata del test è superiore rispetto alla durata del test 4. La differenza fra i SoC iniziali è molto alta (all'incirca del 16%) per cui alcune celle vengono già bilanciate all'inizio del test. Figura 65 mostra le tensioni delle sei celle durante il test 2 mentre Figura 66 mostra l'andamento dei bilanciamenti. Le celle 1 e 4 raggiungono rapidamente la soglia di bilanciamento per cui entrano in una fase di bilanciamento pressoché continuo. Appena le altre celle raggiungono le celle a tensione massima viene attivato il bilanciamento anche per queste ultime. Dopo circa 4100 s la differenza fra le tensioni delle celle è bassa e da quel momento la cella con tensione più bassa varia continuamente. Il bilanciamento è sempre attivo su alcune celle e viene eseguito spesso sulle altre per cui la potenza dissipata dai resistori è alta e lo è anche la temperatura del BMS, specialmente a fine carica, come mostra Figura 67. In Figura 68 viene riportata l'efficienza in termini di potenza durante il test. Alla fine del test, come prevedibile, l'efficienza è molto bassa poiché gran parte della corrente fornita dal caricabatteria scorre attraverso i resistori di bilanciamento.

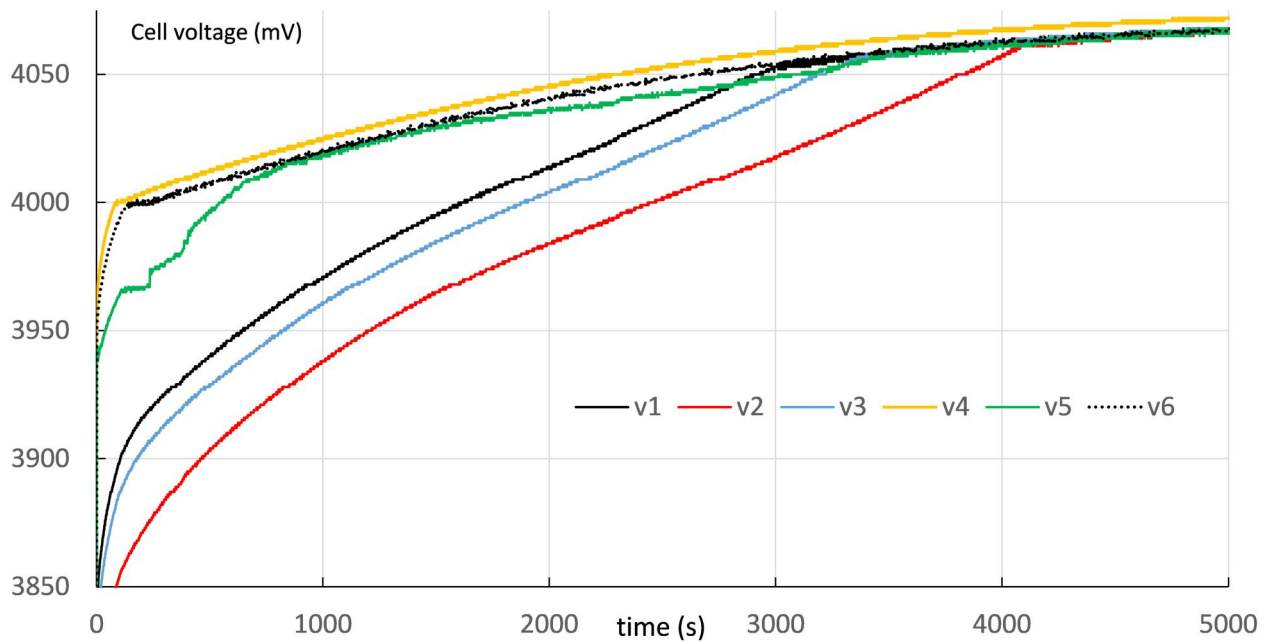


Figura 65: Le tensioni delle 6 celle durante il test 2 condotto utilizzando l'algoritmo B.

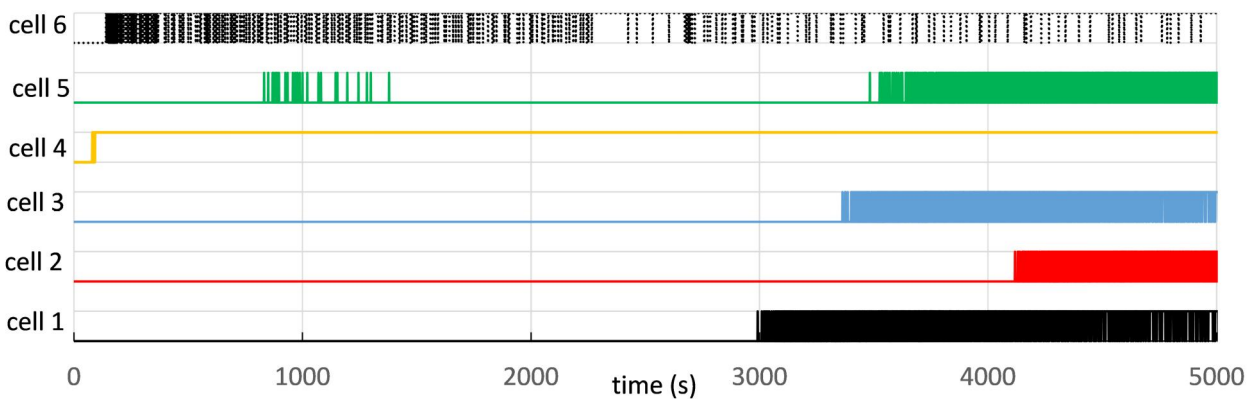


Figura 66: I segnali di controllo dei bilanciamenti delle 6 celle (1:on, 0:off) durante il test 2.

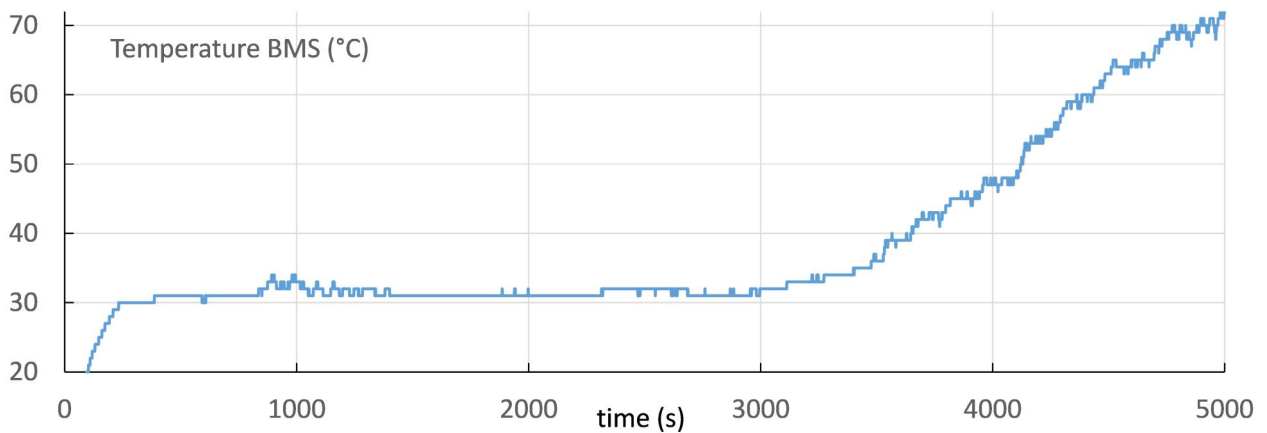


Figura 67: La temperatura del BMS durante la carica del test 2.

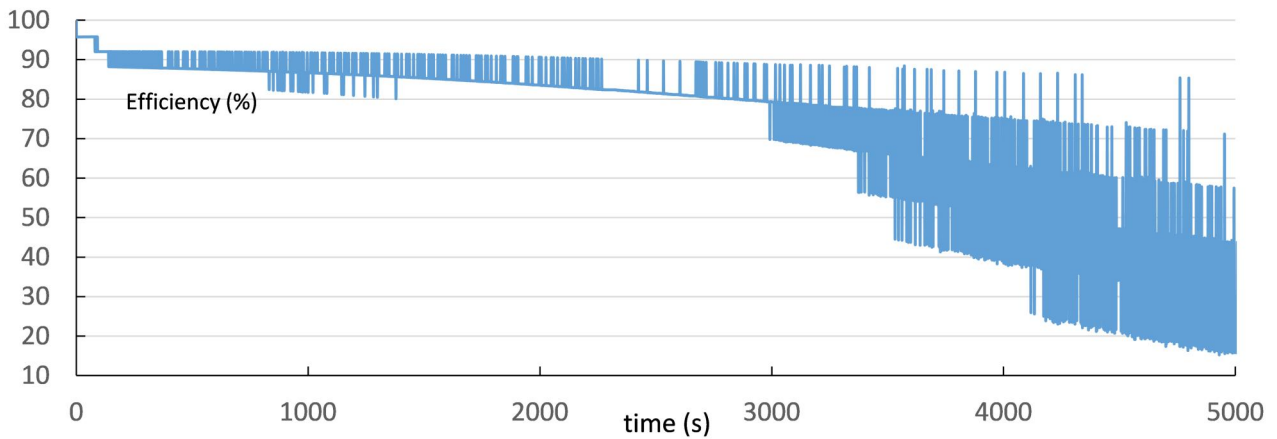


Figura 68: L'efficienza in termini di potenza durante la carica del test 2.

Le prestazioni discusse in dettaglio per il test 2 e per il test 4 sono riassunte nella tabella II che mostra, per tutti i test eseguiti (7) sui due tipi di celle:

- l'efficienza energetica ignorando la dissipazione interna alle celle, definita come:

$$\eta_{\text{not internal}} = \frac{E_{\text{sup}} - E_{\text{bal}}}{E_{\text{sup}}} \quad (29)$$

- l'efficienza energetica:

$$\eta = \frac{E_{\text{sup}} - E_{\text{int}} - E_{\text{bal}}}{E_{\text{sup}}} \quad (30)$$

Dove E_{sup} è l'energia proveniente dal caricabatteria durante la ricarica, E_{int} è l'energia dissipata sulla resistenza interna delle celle, E_{bal} è l'energia dissipata sui resistori di bilanciamento.

- Le temperature massima e media raggiunte durante la carica.
- Il SoC minimo iniziale e la massima differenza di SoC ($d\text{SoC}_{\text{max}}$) fra le celle all'inizio ed al termine della ricarica. Il SoC iniziale di ogni cella $\text{SoC}_i(0)$ è stimato dai parametri del modello, mentre

$$\text{SoC}_i(t) = \text{SoC}_i(0) + \frac{1}{Q_{\text{nom}}} \int_0^t I_i(\tau) d\tau \quad (31)$$

Dove Q_{nom} è la capacità nominale della cella ed $I_i(\tau)$ è la corrente effettiva che fluisce nella cella (considerando la corrente di bilanciamento).

- La tensione minima iniziale delle celle quando viene applicata la corrente di carica, ossia la tensione di circuito aperto (OCV) più la tensione ai capi delle resistenze interne.
- La massima differenza fra le tensioni delle celle all'inizio ed al termine della carica.

$$dV_{\text{max}} = \max_{i=1..n} V_i - \min_{i=1..n} V_i \quad (32)$$

- L'OCV iniziale misurato prima della carica con corrente nulla, e l'OCV finale, stimato dalla misura della tensioni delle celle e dalla caduta di tensione interna stimata.

- La corrente imposta iniziale e finale.
- Il tempo totale delle misure.

Tabella 9: i risultati dei 7 test effettuati utilizzando i due algoritmi A e B.

Algoritmo	Panasonic NCR18650B					Sanyo UR18650F	
	B	B	A	A	A	A	A
test sperimentale [#]	1	2	3	4	5	6	7
$\eta_{\text{not internal}}$ [%]	59,73	75,13	78,88	92,86	93,78	93,76	96,26
η [%]	58,63	73,28	76,52	89,69	91,54	91,84	94
Temperatura max. [°C]	60	76	75	72	72	58	47
Temperatura media [°C]	53,81	43,62	41,39	40,05	33,85	26,70	23,92
SoC_{min} iniziale [%]	25	35	10	55	75	65	40
$dSoC_{\text{max}}$ iniziale [%]	45,0	16,0	35,0	4,0	5,0	3,0	2,0
$dSoC_{\text{max}}$ finale [%]	22,8	2,7	12,9	3,8	4,8	2,8	0,9
V_{min} iniziale [mV]	3714	3816	3525	3932	4092	4003	3855
dV_{max} iniziale [mV]	298	153	229	20	12	13	20
dV_{max} finale [mV]	151	4,83	32	8	7	8	9
OCV_{min} iniziale [mV]	3600	3680	3361	3723	3905	3907	3657
OCV_{max} finale [mV]	4044	4032	4062	3989	4039	3994	4046
Corrente iniziale [A]	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6
Corrente finale [A]	0,348	0,397	0,231	1	0,730	0,688	0,350
Tempo di ricarica [s]	7000	6000	11000	700	500	1000	4500

In tutti i test riportati nella Tabella 9, le tensioni delle celle arrivano a valori di OCV di circa 4,05 V, che corrisponde a circa il 90% del SoC, tranne i test 4 e 6 dove la tensione delle celle arriva a 4 V.

Nei test 1-3 la carica delle celle inizia da un SoC basso per cui il $dSoC_{\text{max}}$ è alto così come lo è il tempo di carica ed il tempo impiegato per i bilanciamenti. Nel test 1 il bilanciamento non è stato completato alla fine del test: dV_{max} è ancora di 150 mV, ma dato che $dSoC_{\text{max}}$ è alto il bilanciamento è continuo per cui la temperatura media è alta e l'efficienza η è bassa.

Si possono confrontare i due algoritmi A e B utilizzando i test 2 e 3. L'algoritmo A del test 3 utilizza, come condizioni iniziali, $SoC_{\text{min}}=10\%$, $dSoC_{\text{max}}=35\%$ e $dV_{\text{max}}=229\text{ mV}$ mentre l'algoritmo B utilizza, nel test 2, le condizioni iniziali $SoC_{\text{min}}=35\%$, $dSoC_{\text{max}}=16\%$ e $dV_{\text{max}}=153\text{ mV}$. Le condizioni iniziali di carica sono dunque peggiori nel test 3 (algoritmo B) rispetto a quelle del test 2 (algoritmo A) ma la temperatura massima e media raggiunte durante il test sono simili, così come l'efficienza energetica.

Nei test 4-7 le differenze iniziali degli stati di carica $dSoC_{\text{max}}$ e delle tensioni delle celle dV_{max} sono basse indicando un bilanciamento di carica inizialmente omogeneo fra le celle. L'algoritmo A ha un'ottima efficienza energetica di oltre il 90% e mediamente la temperatura del BMS è bassa.

La differenza fra $\eta_{\text{not internal}}$ ed η è contenuta ed è circa del 2% indicando che le perdite energetiche sulle resistenze interne sono trascurabili rispetto l'energia coinvolta nel bilanciamento. Gli algoritmi di bilanciamento e carica sono quindi fondamentali per aumentare l'efficienza.

5 Conclusioni

Il lavoro svolto durante i tre anni di dottorato ha permesso di sviluppare una serie di strumenti utili per la caratterizzazione di celle e lo sviluppo di algoritmi per battery management system. Il lavoro si può dividere in due diversi rami: nel primo è stata caratterizzata la cella al litio e sono stati analizzati gli effetti che potrebbero causare le variabilità dei parametri nell'intera batteria; nel secondo è stata proposta una piattaforma utile per lo sviluppo di algoritmi di carica e bilanciamento per BMS.

In dettaglio, nel capitolo 3 è stato presentato un ambiente di simulazione per batterie al litio in System-C WMS che consente di simulare batterie complesse costituite da celle connesse sia in serie che in parallelo. Diversi aspetti sono stati trattati:

- E' stato definito un nuovo modello elettro-termico per celle al litio basato sul modello di Randle con generatore OCV e diversi rami RC. Rispetto ai modelli presenti in letteratura, l'asimmetria del modello durante la carica e la scarica è stata compensata con l'aggiunta di un diodo anziché con l'isteresi nei generatori di OCV.
- E' stata definita una procedura analitica per l'estrazione dei parametri basata sulla procedura HPPC.
- Sono state sviluppate delle librerie per System-C WMS che consentono di simulare le singole celle al litio e le batterie complesse.

Sono state eseguite diverse misure su celle LiFePO₄ da 50 Ah al fine di validare il modello e la procedura di estrazione dei parametri proposti. E' stato definito un ambiente per la simulazione statistica di batterie al litio composte da molte celle. Utilizzando l'ambiente di simulazione proposto possono essere fatte diverse considerazioni in quanto è possibile esaminare le tensioni, le correnti e le temperature di ogni cella, cosa generalmente molto difficile da fare nelle fasi sperimentali. L'ambiente di simulazione è estremamente utile per valutare gli effetti delle strategie del BMS per il bilanciamento di carica sul pacco batteria considerando la variazione statistica dei parametri fra le celle. Nel paragrafo 3.5 sono stati accuratamente analizzate le variabilità delle caratteristiche delle singole celle che compongono le batterie. Nel caso in esame sono stati studiati gli effetti introdotti dalle variabilità dei parametri del modello delle celle in un modulo composto da 6 celle in parallelo utilizzando delle simulazioni Montecarlo applicando dell'aleatorietà prima ai singoli parametri poi a tutti i parametri. Si è visto come i diversi parametri hanno effetti differenti sulle prestazioni del modulo batteria. L'analisi effettuata risulterà utile per la definizione delle specifiche sulla variabilità dei singoli parametri delle celle prima di essere connesse nel modulo e durante lo sviluppo degli algoritmi del BMS cercando di ridurre l'effetto dell'aleatorietà sulle prestazioni delle batterie.

I diversi parametri hanno effetti diversi sulle performance della batteria ed i suoi effetti cambiano nel tempo durante le varie fasi di scarica. Le analisi effettuate consentono di costruire una relazione fra le prestazioni della batteria (valor medio e deviazione standard della tensione di uscita, corrente e SoC) e le variazioni dei singoli parametri delle celle connesse in parallelo nel modulo. Queste analisi permettono di definire le specifiche che devono rispettare le celle connesse in parallelo nella batteria. La variazione dell'OCV ha la più alta influenza fra tutti i parametri. Ad esempio, in Figura 50 si può vedere come una deviazione standard dell'1% sul valore di OCV, comporta una

deviazione standard del $10/33=30\%$ sul valore di corrente che fluisce nelle celle. La stessa analisi può essere utilizzata per evidenziare come l'incertezza sulla stima dei parametri della singola cella può causare un errore sulla stima del SoC e conseguentemente sugli effetti dell'algoritmo del BMS.

Il capitolo 4 descrive una piattaforma hardware/software utile per lo sviluppo di algoritmi di bilanciamento e ricarica di BMS. La piattaforma è composta da un BMS open-source, un caricabatteria, sei celle al litio ed un software che controlla il test ed ingloba modelli ed algoritmi.

L'algoritmo di gestione della carica interagisce con l'algoritmo di bilanciamento passivo. Sono stati condotti diversi test: i primi per validare la piattaforma HW/SW (paragrafo 4.2), ed altri per il confronto di algoritmi (paragrafo 4.3).

Il test di validazione evidenzia le potenzialità della piattaforma che consente di validare gli algoritmi di carica e bilanciamento sviluppati e simulati in MATLAB utilizzando delle reali celle al litio, un BMS ed un caricabatterie. I test mostrano come la temperatura del BMS sia un aspetto critico da gestire, in particolar modo quando lo sbilanciamento di carica fra le celle è rilevante. Il BMS infatti deve evitare il superamento della temperatura massima della scheda.

In seguito sono stati sviluppati e confrontati due diversi algoritmi di bilanciamento e carica che tengono conto del surriscaldamento del BMS. Gli algoritmi sono stati sviluppati con l'obiettivo di massimizzare l'efficienza energetica quindi sono stati definiti degli indicatori di performance che hanno reso possibile il confronto. I risultati mostrano come gli algoritmi proposti consentono di migliorare l'efficienza energetica ed il controllo della temperatura del BMS.

Oltre a migliorare l'efficienza energetica la piattaforma può essere utilizzata per ottimizzare i tempi di ricarica o migliorare gli algoritmi di stima del SoC o dell'SoH. Sviluppando gli algoritmi come funzioni MATLAB è possibile, con lo stesso porzione di codice, prima simulare il comportamento degli algoritmi sul modello di celle al litio proposto al paragrafo 3.1, poi validare gli stessi algoritmi utilizzando la piattaforma e delle reali celle al litio.

Bibliografia

- [1] M. Conti, D. Fedeli, and M. Virgulti, "Bluetooth for electric vehicle to smart grid connection," *Intell. Solut. Embed. Syst. (WISES), 2011 Proc. Ninth Work.*, pp. 13–18, 2011.
- [2] W. Su, H. Eichi, W. Zeng, and M.-Y. Chow, "A Survey on the Electrification of Transportation in a Smart Grid Environment," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, Feb. 2012.
- [3] G. Ritrovati, G. De Maso-Gentile, C. Scavongelli, and M. Conti, "Active role of a NFC enabled smartphone in EV-EVSE charging process," in *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, 2014, pp. 1–8.
- [4] J. Nguyen and C. Taylor, "Safety performance for phosphate based large format lithium-ion battery," *2004 10th Int. Work. Comput. Electron. (IEEE Cat. No.04EX915)*, pp. 146–148, 2004.
- [5] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 226, pp. 272–288, 2013.
- [6] F. Baronti, W. Zamboni, R. Roncella, R. Saletti, and G. Spagnuolo, "Open-circuit voltage measurement of Lithium-Iron-Phosphate batteries," *Instrum. Meas. Technol. Conf. (I2MTC), 2015 IEEE Int.*, pp. 1711–1716, 2015.
- [7] J. Cao, N. Schofield, and A. Emadi, "Battery balancing methods: A comprehensive review," *2008 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2008*, pp. 3–8, 2008.
- [8] M. Daowd, N. Omar, P. van den Bossche, and J. van Mierlo, "A review of passive and active battery balancing based on MATLAB/Simulink," *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 7, pp. 2974–2989, 2011.
- [9] J. Qi and D. Dah-Chuan Lu, "Review of battery cell balancing techniques," *2014 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2014 - Proc.*, no. October, pp. 1–6, 2014.
- [10] M. Daowd, N. Omar, P. Van Den Bossche, and J. Van Mierlo, "Passive and active battery balancing comp. based on MATLAB sim.," *Veh. Power Propuls. Conf.*, 2011.
- [11] R. Xiong, J. Cao, Q. Yu, H. He, and F. Sun, "Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1832–1843, 2018.
- [12] T. Kim, W. Qiao, and L. Qu, "Online SOC and SOH estimation for multicell lithium-ion batteries based on an adaptive hybrid battery model and sliding-mode observer," *2013 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2013*, pp. 292–298, 2013.
- [13] C. Lin, A. Tang, and W. Wang, "A Review of SOH Estimation Methods in Lithium-ion Batteries for Electric Vehicle Applications," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1920–1925, 2015.

- [14] T. Wang, C. Zhu, L. Pei, R. Lu, and B. Xu, "The State of Arts and Development Trend of SOH Estimation for Lithium-Ion Batteries," in *2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2013, pp. 1–6.
- [15] B. Balagopal and M. Y. Chow, "The state of the art approaches to estimate the state of health (SOH) and state of function (SOF) of lithium Ion batteries," *Proceeding - 2015 IEEE Int. Conf. Ind. Informatics, INDIN 2015*, no. 2, pp. 1302–1307, 2015.
- [16] S. Orcioni, L. Buccolini, A. Ricci, and M. Conti, "Lithium-ion Battery Electrothermal Model, Parameter Estimation, and Simulation Environment," *Energies 2017, Vol. 10, Page 375*, vol. 10, no. 3, p. 375, 2017.
- [17] C. Scavongelli, F. Francesco, S. Orcioni and M. Conti, "Battery management system simulation using SystemC," 2015 12th International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES), Ancona, 2015, pp. 151-156.
- [18] C. Fleischer, D. U. Sauer, J. V. Barreras, E. Schaltz, and A. E. Christensen, "Development of software and strategies for Battery Management System testing on HIL simulator," *2016 11th Int. Conf. Ecol. Veh. Renew. Energies, EVER 2016*, 2016.
- [19] Y. Ma, B. Li, X. Zhou, and H. Chen, "Battery state of charge estimation hardware-in-loop system design based on xPC target," *Proc. World Congr. Intell. Control Autom.*, vol. 2016–Septe, pp. 1338–1343, 2016.
- [20] L. Buccolini, S. Orcioni, S. Longhi and M. Conti, "Cell Battery Emulator for Hardware-in-the-Loop BMS Test," *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Palermo, 2018, pp. 1-5
- [21] S. Orcioni, A. Ricci, L. Buccolini, C. Scavongelli and M. Conti, "Effects of variability of the characteristics of single cell on the performance of a lithium-ion battery pack," *2017 13th Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES)*, Hamburg, 2017, pp. 15-21.
- [22] S. Orcioni, A. Ricci, L. Buccolini, and M. Conti, "Statistical characterization of lithium-ion batteries using SystemC-WMS," in *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2017, pp. 1–7.
- [23] L. Buccolini, F. Garbuglia, M. Unterhorst, and M. Conti, "HW platform for BMS algorithm validation," *PRIME 2018 - 14th Conf. Ph.D. Res. Microelectron. Electron.*, pp. 1–4, 2018.
- [24] Wikipedia, "Pila (elettronica)." [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Pila_\(elettronica\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Pila_(elettronica)). [Accessed: 30-Nov-2018].
- [25] Woodbank Communications Ltd, "Cell Construction." [Online]. Available: https://www.mpoweruk.com/cell_construction.htm#flexible. [Accessed: 30-Nov-2018].

- [26] K. W. E. Cheng, B. P. Divakar, H. Wu, K. Ding, and H. F. Ho, "Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 76–88, 2011.
- [27] K. Makinejad, R. Arunachala, S. Arnold, H. Ennifar, H. Zhou, A. Jossen, and W. Changyun, "A lumped electro-thermal model for Li-ion cells in electric vehicle application," *28th Int. Electr. Veh. Symp. Exhib. 2015, EVS 2015*, pp. 1–13, 2015.
- [28] L. Liu, L. Y. Wang, Z. Chen, C. Wang, F. Lin, and H. Wang, "Integrated system identification and state-of-charge estimation of battery systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 1, pp. 12–23, 2013.
- [29] B. Pattipati, K. Pattipati, J. P. Christopherson, S. M. Namburu, D. V. Prokhorov, and L. Q. L. Qiao, "Automotive battery management systems," *2008 Ieee Autotestcon*, no. September, pp. 8–11, 2008.
- [30] R. Ahmed, J. Gazzarri, S. Onori, S. Habibi, R. Jackey, K. Rzemien, J. Tjong, and J. LeSage, "Model-Based Parameter Identification of Healthy and Aged Li-ion Batteries for Electric Vehicle Applications," *SAE Int. J. Altern. Powertrains*, vol. 4, no. 2, pp. 2015-01–0252, 2015.
- [31] M. Cacciato, G. Nobile, G. Scarcella, and G. Scelba, "Real-Time Model-Based Estimation of SOC and SOH for Energy Storage Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 1, pp. 794–803, 2017.
- [32] T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri, and R. Jackey, "High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells," *2012 IEEE Int. Electr. Veh. Conf. IEVC 2012*, pp. 1–8, 2012.
- [33] Lijun Gao, Shengyi Liu, and R. A. Dougal, "Dynamic lithium-ion battery model for system simulation," *IEEE Trans. Components Packag. Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 495–505, Sep. 2002.
- [34] S. X. Chen, H. B. Gooi, N. Xia, and M. Q. Wang, "Modelling of lithium-ion battery for online energy management systems," *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 2, no. 4, p. 202, 2012.
- [35] C. Sinkaram, K. Rajakumar, and V. Asirvadam, "Modeling battery management system using the lithium-ion battery," in *2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, 2012, pp. 50–55.
- [36] T. Inl, "Battery Test Manual for Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *Contract*, vol. 158, no. March, pp. 1720–1723, 2010.
- [37] M. T. Lawder, B. Suthar, P. W. C. Northrop, S. De, C. M. Hoff, O. Leitermann, M. L. Crow, S. Santhanagopalan, and V. R. Subramanian, "Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications," *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 1014–1030, Jun. 2014.

- [38] Y. Y. Y. Yuan, X. W. X. Wei, and Z. S. Z. Sun, "Assessment of power consumption control strategy for battery management system using hardware-in-the-loop simulation," *2008 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 8–13, 2008.
- [39] M. Brandl, H. Gall, M. Wenger, V. Lorentz, M. Giegerich, F. Baronti, G. Fantechi, L. Fanucci, R. Roncella, R. Saletti, S. Saponara, A. Thaler, M. Cifrain, and W. Prochazka, "Batteries and battery management systems for electric vehicles," in *2012 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2012, pp. 971–976.
- [40] G. De Maso-Gentile, A. Bacà, L. Ambrosini, S. Orcioni and M. Conti, "Design of CAN to Bluetooth gateway for a Battery Management System," *2015 12th International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES)*, Ancona, 2015, pp. 171-175.
- [41] L. Buccolini, A. Ricci, C. Scavongelli, G. DeMaso-Gentile, S. Orcioni and M. Conti, "Battery Management System (BMS) simulation environment for electric vehicles," *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Florence, 2016, pp. 1-6.
- [42] K.-S. Ng, C.-S. Moo, Yi-Ping Chen, and Y.-C. Hsieh, "State-of-charge estimation for lead-acid batteries based on dynamic open-circuit voltage," in *2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, 2008, pp. 972–976.
- [43] M. Coleman, C. K. Lee, C. Zhu, and W. G. Hurley, "State-of-charge determination from EMF voltage estimation: Using impedance, terminal voltage, and current for lead-acid and lithium-ion batteries," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 5, pp. 2550–2557, 2007.
- [44] K. S. Ng, C.-S. Moo, Y.-P. Chen, and Y.-C. Hsieh, "Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1506–1511, Sep. 2009.
- [45] M. Carloni, R. d'Aparo, P. Scorrano, B. Naticchia, M. Conti, "A micropower supervisor for wireless nodes with a digital pulse frequency modulator battery monitor," *Proc. SPIE 8764, VLSI Circuits and Systems VI*, 87640P (28 May 2013)
- [46] F. Altaf, B. Egardt, and L. J. Mårdh, "Load Management of Modular Battery Using Model Predictive Control : Thermal and State-of-Charge Balancing," vol. 25, no. 1, pp. 1–16, 2016.
- [47] F. Baronti, R. Saletti, and W. Zamboni, "Open Circuit Voltage of Lithium-ion batteries for energy storage in DC microgrids," in *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, 2015, pp. 343–348.
- [48] S. Orcioni, G. Biagetti, and M. Conti, "SystemC-WMS: Mixed-Signal Simulation Based on Wave Exchanges," in *Applications of Specification and Design Languages for SoCs*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2006, pp. 171–185.
- [49] G. Biagetti, M. Giammarini, M. Ballicchia, M. Conti, and S. Orcioni, "SystemC-WMS: wave mixed signal simulator for non-linear heterogeneous systems," *Int. J. Embed. Syst.*, vol. 6, no. 4, p. 277, 2014.

- [50] S. Orcioni, "SystemC-WMS." [Online]. Available: <https://github.com/orcioni/systemc-wms>. [Accessed: 10-Jan-2017].
- [51] F. Garbuglia, M. Unterhorst, L. Buccolini, S. Orcioni, and M. Conti, "Experimental analysis of Battery Management System algorithms of Li-ion batteries." APPEPIES 2018 6th Int. Conf. Applications in Electronics Pervading Industry Environment Society, Pisa, 26 Sept. 2018.
- [52] N. Damay, C. Forgez, M. P. Bichat, and G. Friedrich, "Thermal modeling of large prismatic LiFePO₄/graphite battery. Coupled thermal and heat generation models for characterization and simulation," *J. Power Sources*, vol. 283, pp. 37–45, 2015.
- [53] L. McCurlie, M. Preindl, and A. Emadi, "Fast Model Predictive Control for Redistributive Lithium-Ion Battery Balancing," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 2, pp. 1350–1357, Feb. 2017.
- [54] S. Narayanaswamy, M. Kauer, S. Steinhorst, M. Lukasiewicz, and S. Chakraborty, "Modular Active Charge Balancing for Scalable Battery Packs," *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 974–987, Mar. 2017.
- [55] M. Giammarini, M. Conti, and S. Orcioni, "System-level energy estimation with Powersim," in *2011 18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems*, 2011, pp. 723–726.
- [56] W. C. Lee, D. Drury, and P. Mellor, "Comparison of passive cell balancing and active cell balancing for automotive batteries," *2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2011*, 2011.
- [57] X. Tian, B. Jeppesen, T. Ikushima, F. Baronti, and R. Morello, "Accelerating State-Of-Charge Estimation in FPGA-based Battery Management Systems," in *6th Hybrid and Electric Vehicles Conference (HEVC 2016)*, 2016, p. 4 (6.)-4 (6.).

Elenco pubblicazioni:

Rivista internazionale

- Titolo An Energy Harvester Interface for Self-Powered Wireless Speed Sensor
- Autori L. Buccolini, M. Conti
- Editore IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 4, pp. 1097-1104
- Data Feb.15, 2017 doi: 10.1109/JSEN.2016.2635940

- Titolo Lithium-ion Battery Electrothermal Model, Parameter Estimation, and Simulation Environment
- Autori Simone Orcioni, Luca Buccolini, Adriana Ricci, Massimo Conti
- Editore MDPI journal: Energies, Volume 10, Issue 3 (March 2017), 375, pp. 1-20; ISSN: 1996-1073
- Data Marzo 2017 doi: 10.3390/en10030375

Capitolo su Libro Internazionale (in pubblicazione)

- Titolo Experimental analysis of Battery Management System algorithms of Li-ion batteries
- Autori Federico Garbuglia, Matteo Unterhorst, Luca Buccolini, Simone Orcioni, Massimo Conti
- Editore APPLEPIES 2018 6th Int. Conf. Applications in Electronics Pervading Industry Environment Society, Pisa, 26 Sept. 2018, in publication on the book Springer LNEE series
- Data In pubblicazione

Congresso internazionale

- Titolo *Design and energetic analysis of a self-powered Bluetooth low energy speed sensor*
- Autori Luca Buccolini ; Paola Pierleoni ; Massimo Conti
- Conferenza 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)
- Data Pubblicazione IEEE Xplore: 01/09/2016 Conferenza: 7-10 Giugno 2016, Firenze

- Titolo *Battery Management System (BMS) simulation environment for electric vehicles*
- Autori Luca Buccolini ; Adrianna Ricci ; Cristiano Scavongelli ; Giuseppe DeMaso-Gentile ; Simone Orcioni ; Massimo Conti
- Conferenza 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)
- Data Pubblicazione IEEE Xplore: 01/09/2016 Conferenza: 7-10 Giugno 2016, Firenze

- Titolo Effects of variability of the characteristics of single cell on the performance of a lithium-ion battery pack
- Autori Simone Orcioni; Adriana Ricci; Luca Buccolini; Cristiano Scavongelli; Massimo Conti
- Conferenza 2017 13th Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES), Pages: 15 - 21; ISBN: ISBN:978-1-5386-1157-9;
- Data 12-13 June 2017, Hamburg, doi: 10.1109/WISES.2017.7986926 Germany

- Titolo Statistical characterization of Lithium-ion batteries using SystemC-WMS

- Autori Simone Orcioni, Arianna Ricci, Luca Buccolini, Massimo Conti
- Conferenza Proc. of IEEE 17th Int. Conference on Environmental and Electrical Engineering, EEEIC 2017
- Data June 6-9 2017, Milano DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977744

- Titolo Cell battery emulator for hardware-in-the-loop BMS test
- Autori Luca Buccolini, Simone Orcioni, Sauro Longhi, Massimo Conti
- Conferenza Proc. of IEEE 18th Int. Conference on Environmental and Electrical Engineering, EEEIC 2018
- Data June 12-15 2018, Palermo

- Titolo Electric veichles charging reservation based on OCPP
- Autori Simone Orcioni, Luca Buccolini, Adriana Ricci, Massimo Conti
- Conferenza Proc. of IEEE 18th Int. Conference on Environmental and Electrical Engineering, EEEIC 2018
- Data June 12-15 2018, Palermo

- Titolo HW platform for BMS algorithm validation
- Autori Luca Buccolini, Federico Garbuglia, Matteo Unterhorst, Massimo Conti
- Conferenza 14th Conference on PhD Research in Microelectronics and Electronics PRIME 2018
- Data July 2-5 2018, Prague, Czech Republic

- Titolo Energy harvesting and wearable technologies for sleep monitoring
- Autori Massimo Conti, Roberto Lombardi, Adriana Ricci, Luca Buccolini, Simone Orcioni
- Conferenza Proc. of 2016 International Workshop on Analysis of biometric parameters to detect relationships between stress and sleep quality (AnBiPa 2016), pp. 67-74; ISBN: 978-88-87548-09-9
- Data Ancona, Italy, November 4, 2016,