

# POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica



## Politecnico di Torino

Tesi di Laurea Magistrale

## Power Unit Life Status Evaluation

**Relatore**

Prof. Danilo Demarchi

**Correlatore**

Dott. Francesco Pennaroli

**Candidato**

Michele Mario Murgia

July 2025



# Sommario

Il presente lavoro di tesi nasce dalla collaborazione con BlueThink S.p.A., azienda di ingegneria con consolidata esperienza nell'innovazione e nello sviluppo prodotto in diversi settori, tra cui quello delle batterie.

L'aumento della diffusione di sistemi a batteria su larga scala ha reso necessario lo sviluppo di soluzioni sempre più complesse e performanti, in grado di garantire elevati livelli di efficienza, densità energetica, sicurezza e affidabilità. In tale contesto si inserisce lo studio e lo sviluppo di PULSE (Power Unit Life Status Evaluation), un sistema innovativo, intelligente, flessibile e wireless per il monitoraggio e la gestione di celle agli ioni di litio.

PULSE è progettato per monitorare in tempo reale i principali parametri di una singola cella — tensione, corrente, temperatura e accelerazione — e per comunicare i dati raccolti a un ambiente cloud tramite protocollo BLE. Il dispositivo integra strategie avanzate di protezione e controllo preventivo, in grado di intervenire in caso di condizioni operative critiche (overvoltage, undervoltage, sovraccarico, overtemperature), aumentando così la sicurezza e la longevità della batteria.

L'attività di ricerca ha riguardato la progettazione hardware (HW) e lo sviluppo firmware (FW) di due prototipi successivi del sistema, sottoposti a design review e validazione funzionale nell'arco di un anno di sviluppo. I prototipi sono stati testati in diverse condizioni operative, consentendo la calibrazione accurata dei sensori integrati. PULSE comunica inoltre con un'interfaccia grafica (GUI) sviluppata in Python, sulla quale sono stati implementati algoritmi per la stima dello State of Charge (SOC) e dello State of Health (SOH).

I risultati ottenuti dimostrano l'efficacia del sistema nel fornire un monitoraggio specifico e affidabile della cella, integrando funzionalità avanzate di diagnostica e prevenzione. PULSE si propone quindi come una soluzione innovativa e versatile rispetto ai tradizionali Battery Management System (BMS), con l'obiettivo di supportare un utilizzo più sicuro ed efficiente delle batterie.





# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	VII
<b>Acronimi</b>	X
<b>1 Introduzione</b>	1
1.1 Obiettivi tesi . . . . .	2
<b>2 Batterie agli ioni di litio</b>	3
2.1 Celle elettrochimiche . . . . .	9
2.1.1 Principio di funzionamento . . . . .	10
2.1.2 Formati di batterie . . . . .	12
2.1.3 Condizioni operative pericolose . . . . .	14
Abuso elettrico . . . . .	15
Abuso termico . . . . .	15
2.1.4 Modellizzazione della cella . . . . .	16
<b>3 Battery Management System</b>	20
3.1 Principali parametri di controllo . . . . .	20
Monitoraggio . . . . .	21
Protezione . . . . .	21
Bilanciamento . . . . .	21
Segnalazione . . . . .	22
3.1.1 Controllo della tensione . . . . .	22
3.1.2 Controllo della corrente . . . . .	24
3.1.3 Controllo della temperatura . . . . .	27
3.2 Stima degli stati della batteria . . . . .	30
3.2.1 Stima dello stato di carica (SOC) . . . . .	31
Approcci per la stima dell'SOC . . . . .	31
3.2.2 Stima dello stato di salute (SOH) . . . . .	46
3.3 Bilanciamento delle celle . . . . .	47
3.3.1 Bilanciamento passivo . . . . .	48

3.3.2	Bilanciamento attivo . . . . .	49
	Bilanciamento attivo con convertitore Flyback . . . . .	49
	Bilanciamento attivo con condensatori . . . . .	50
	Bilanciamento attivo con induttori . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Progettazione dispositivo</b>	<b>54</b>
4.1	Sviluppo Hardware . . . . .	55
4.2	Sviluppo Firmware . . . . .	64
4.3	Sviluppo GUI . . . . .	66
4.4	Algoritmo SOC e SOH . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Verifica e validazione</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>80</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>84</b>

# Elenco delle figure

2.1	Energia specifica e potenza specifica delle batterie ricaricabili [1]. . .	4
2.2	Caratteristiche delle batterie ricaricabili comunemente usate [2]. . .	7
2.3	Celle in serie [3] . . . . .	9
2.4	Celle in parallelo [3] . . . . .	9
2.5	Struttura cella agli ioni di litio [5]. . . . .	11
2.6	Principio di funzionamento delle celle agli ioni di litio [5]. . . . .	12
2.7	Thevenin [8] . . . . .	17
2.8	Modello basato sull'impedenza [8] . . . . .	18
2.9	Modello basato sull'esecuzione in tempo reale [8] . . . . .	19
3.1	Funzionalità di un BMS [10] . . . . .	20
3.2	I FET di bilanciamento delle celle in bypass vengono utilizzati per rallentare la velocità di carica di una cella durante il ciclo di carica [11]	23
3.3	Il bilanciamento attivo viene utilizzato durante il ciclo di scarica per prelevare carica da una cella forte e trasferirla a una cella debole [11]	24
3.4	Rilevamento della corrente con shunt [12] . . . . .	25
3.5	Rilevamento della corrente con sensore a effetto Hall [12] . . . . .	26
3.6	Circuito partitore di tensione [12] . . . . .	28
3.7	Esempio di utilizzo di un termistore [12] . . . . .	29
3.8	SOC and SOH effects of a battery [14] . . . . .	30
3.9	Diagramma di flusso dell'algoritmo di conteggio di Coulomb migliorato [15] . . . . .	36
3.10	Algoritmo per calcolare $f(t)$ [15] . . . . .	40
3.11	Algoritmo per combinare i passaggi di deconvoluzione e convoluzione [15] . . . . .	41
3.12	Circuito equivalente di tipo Thevenin (in dettaglio a Modello elettrico Thevenin) [15] . . . . .	42
3.13	Principio del filtro di Kalman [15] . . . . .	45
3.14	Algoritmo del filtro di Kalman [15] . . . . .	45
3.15	Tipi di bilanciamento [17] . . . . .	48
3.16	Circuito per il bilanciamento passivo [18] . . . . .	48

3.17	Bilanciamento con convertitore Flyback [18]	50
3.18	Bilanciamento con condensatori [18]	51
3.19	Circuito di bilanciamento basato sugli induttori [18]	52
3.20	Circuito di bilanciamento basato sugli induttori per 8 celle [18]	53
4.1	Visione frontale PCB polo negativo	56
4.2	Visione posteriore PCB polo negativo	57
4.3	Visione frontale PCB polo positivo	58
4.4	Visione posteriore PCB polo positivo	59
4.5	Connessione di PULSE ad una cella cilindrica 21700	60
4.6	Montaggio su cella prismatica	61
4.7	Montaggio su cella cilindrica	62
4.8	Circuito Antenna	63
4.9	Schema interfaccia grafica	66
4.10	Connessione con il dispositivo	67
4.11	Visione dati e grafico in tempo reale	67
4.12	Scarica a corrente costante	68
4.13	Circuito di scarica a corrente costante	69
5.1	Setup di test per la validazione del Buck-Boost	71
5.2	Test discreto con variazione di input	72
5.3	Test continuo con variazione di input	72
5.4	Test continuo con variazione di carico	73
5.5	Setup di test per il sensore di corrente ad effetto Hall	74
5.6	Caratteristica di corrente ottenuta dal chip ad effetto Hall	75
5.7	Test accelerometro	76
5.8	Setup per il test di sistema	77
5.9	Test della tensione	78
5.10	Test della corrente	78
5.11	Test della temperatura	79



# Acronimi

**BLE**

Bluetooth Low Energy

**BMS**

Battery Management System

**DMM**

Digital Multimeter

**DoD**

Depth of Discharge

**EKF**

Extended Kalman Filter

**MCU**

Micro Controller Unit

**MEMS**

Micro-Electro-Mechanical Systems

**OCV**

Open Circuit Voltage

**PCB**

Printed Circuit Board

**PWM**

Pulse Width Modulation

**RTOS**

Real Time Operating System

**SEI**

Solid Electrolyte Interphase

**SOC**

State of Charge

**SOH**

State of Health

**NTC**

Negative Temperature Coefficient

# Capitolo 1

## Introduzione

Tra le diverse chimiche di cella utilizzate nell'accumulo elettrico, le batterie agli ioni di litio grazie alla loro alta densità energetica per peso e volume sono la tecnologia dominante. Tuttavia, per ottenere delle buone prestazioni e una sicurezza operativa è richiesto un monitoraggio preciso e continuo dei parametri di cella, in particolare la temperatura e la tensione. Questi parametri sono importanti per le batterie agli ioni di litio poiché le sovratensioni e sovrascariche possono causare danni permanenti o l'esplosione delle celle. Il monitoraggio costante della tensione e della temperatura è fondamentale per la sicurezza d'utilizzo e per un maggiore durata di vita operativa. Per far fronte a questi problemi, sono stati creati sistemi di gestione della batteria che monitorano e controllano il funzionamento di ogni cella. Questi sistemi integrano sensori per monitorare tensione, temperatura e corrente, con l'affiancamento di algoritmi di stima per lo stato di carica e lo stato di salute, in modo da proteggere la batteria da condizioni pericolose. Il seguente lavoro di tesi affronta lo sviluppo di un sistema di monitoraggio intelligente con raccolta dati su cloud tramite protocollo wireless per le batterie agli ioni di litio. L'obiettivo principale della ricerca è analizzare il comportamento delle batterie agli ioni di litio, progettando soluzioni poco invasive in modo tale da poterle inserire facilmente nei comuni pacchi batteria e da fornire un preciso monitoraggio su singola cella durante l'uso. Inoltre, si implementeranno degli algoritmi per la predizione dello stato di carica e dello stato di salute, utili a stimare condizioni di pericolo. Per raggiungere questi obiettivi, verranno svolte analisi dettagliate sul modello di batteria, con vari test per comprendere le dinamiche di funzionamento e per ottimizzare la predizione dell'SOC delle batterie agli ioni di litio. Successivamente, esaminate e testate le performance in situazioni di pericolo, in modo da poter verificare il corretto rilevamento e la segnalazione nelle situazioni di pericolo. Questo studio intende fornire un contributo importante allo sviluppo di soluzioni tecnologiche avanzate, promuovendo una gestione modulare e sostenibile grazie alla sua riusabilità.

## **1.1 Obiettivi tesi**

La seguente tesi propone di sviluppare un sistema avanzato per il monitoraggio delle batterie agli ioni di litio. L'obiettivo principale è l'implementazione di un BMS che sia in grado di:

- Rilevazione di condizioni di overvoltage e undervoltage
- Rilevazione di condizioni di overtemperature e undertemperature
- Rilevazione di condizioni di overcurrent
- Rilevazione urti
- Comunicazione dei dati di monitoraggio con protocollo BLE
- Stima dello SOC e dello SOH
- Dimensioni ridotte e flessibili in modo da garantire un'elevata integrabilità nei sistemi di comune utilizzo

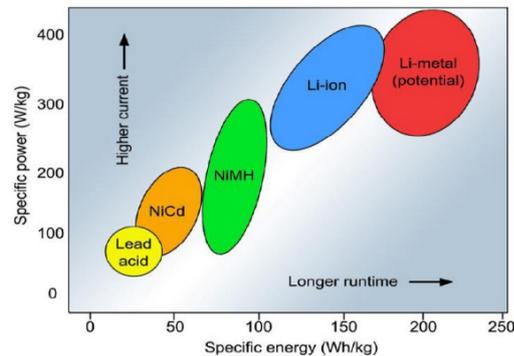
## Capitolo 2

# Batterie agli ioni di litio

L'accumulo di energia in ambito industriale ha subito un'evoluzione significativa dovuta alla crescente necessità di fonti energetiche sostenibili ed efficienti, la quale ha portato alla necessità di sviluppare nuove tecnologie [1]. L'evoluzione delle tecnologie principalmente impiegate nei sistemi di accumulo energetico, come le batterie al piombo-acido e le tecnologie a base di Ni-Cd e NiMH, ha condotto i sistemi a richiedere alta densità energetica favorendo l'impiego delle batterie agli ioni di litio [1]. Queste ultime, grazie alla loro elevata densità energetica, lunga durata operativa e maggiore efficienza, sono oggi considerate fondamentali per applicazioni industriali che spaziano dai sistemi consumer e sistemi di backup alle applicazioni di accumulo per energie rinnovabili [1]. Le batterie avanzano su due fronti:

- l'aumento di energia specifica per tempi di esecuzione più lunghi
- potenza specifica migliorata per esigenze di carico ad alta corrente

Il miglioramento di una caratteristica della batteria potrebbe non rafforzare automaticamente le altre ma c'è spesso un compromesso. La Figura 2.1 illustra la relazione tra energia specifica in Wh/kg e potenza specifica in W/kg.



**Figura 2.1:** Energia specifica e potenza specifica delle batterie ricaricabili [1].

L'energia specifica è la capacità che una batteria può trattenere in watt-ora per chilogrammo (Wh/kg), e la potenza specifica è l'abilità della batteria di fornire potenza in watt per chilogrammo (W/kg).

Si evidenziano le limitazioni come la lentezza di ricarica, la limitazione di immagazzinamento dell'energia e una durata di vita operativa in condizioni ottimali breve, dovute all'origine elettrochimica da cui viene creata l'energia delle batterie. Analizzando le statistiche la batteria sembra evolversi lentamente. In confronto alla Legge di Moore, secondo cui il numero di transistor in un circuito integrato raddoppia ogni due anni, la capacità del litio-ione è aumentata solo dell'8% all'anno negli ultimi due decenni. Questo tasso si è ridotto al 5%, ma la buona notizia è una riduzione del costo dell'8% all'anno.

I progressi ci sono, ma non senza ostacoli. Il litio-aria, soluzione con un'energia specifica teorica elevata, è stato rallentato dalle proprietà della batteria di assorbire l'ossigeno dall'ambiente, la quale causa problemi di stabilità e creazione di impurità nell'aria. Il litio-metallo nonostante sembri essere una soluzione allettante, è soggetta alla creazione di dendriti che possono causare dei cortocircuiti, i quali potrebbero ad eventi pericolosi. Il litio-zolfo potrebbe essere un'altra alternativa, ma il suo utilizzo è impedito dalla difficoltà a risolvere il problema della breve durata dei cicli. La batteria di flusso si identifica come una soluzione alternativa per sistemi di accumulo di grandi dimensioni, inniettando soluzioni elettrolitiche fluide, con specie redox, da serbatoi esterni attraverso una batteria elettrochimica munita di una membrana, bensì il sistema presenta problemi di corrosione. Una soluzione sondata per aumentare la densità energetica del litio-ione è anche l'utilizzo di un rivestimento di spessore monoatomico in grafene sull'anodo [1]. Tali sistemi mirano non solo a migliorare la densità energetica e la capacità di erogare potenze elevate in tempi brevi, ma anche a ottimizzare la gestione termica e la stabilità operativa degli impianti di accumulo, riducendo i tempi di ricarica e favorendo una maggiore efficienza complessiva. Affinché una batteria funzioni correttamente come sistema

di accumulo di energia deve possedere otto elementi fondamentali:

**1. Elevata energia specifica**

Una caratteristica importante nei prodotti di consumo è la lunga durata ottenuta dai produttori costruendo batterie con alti valori di ampere-ora (Ah). Perciò utilizzare litio-ione equivale a alta energia specifica. Ciò non significa che tutte le batterie agli ioni di litio abbiano un valore elevato di ampere-ora. Mentre una cella di energia in un pacchetto 18650 può avere 250 Ah/kg, la stessa chimica in una cella di potenza è 150 Ah/kg o meno, mentre una cella agli ioni di litio di lunga-vita si abbassa a valori di circa 60 Ah/kg. Inoltre, NiMH in ambito consumer ha circa 90 Ah/kg rispetto a un 45 Ah/kg delle unità di lunga durata utilizzate nella propulsione elettrica, quasi pari con la tecnologia al piombo [1].

**2. Alta potenza specifica**

Le batterie devono poter fornire un elevata capacità di carico per adempiere alle richieste di carico istantanee, come accade in applicazioni di utilizzo di utensili elettrici e sistemi di propulsione elettrica , ma l'energia specifica è bassa [1].

**3. Prezzo accessibile**

I costi di produzione devono essere adatti all'applicazione di impiego e sono influenzati da materiali utilizzati, dai processi di fabbricazione, dalla qualità e dalla durabilità della cella. La produzione in serie contribuisce in parte a ridurre i costi [1].

**4. Lunga vita operativa**

La qualità dei materiali e la capacità di resistere ai fenomeni di invecchiamento sono importanti per poter garantire una longevità e una costanza delle prestazioni. Tuttavia, la durabilità e la qualità di prestazione sono influenzate anche dall'utilizzo della batteria, ad esempio un uso a temperature fuori dall'intervallo operativo porterebbe a un precoce invecchiamento [1].

**5. Sicurezza di uso**

Le batterie agli ioni di litio sono una tecnologia molto reattiva e instabile che implica l'adozione di strategie di gestione e protezione. Ad esempio, l'utilizzo delle chimiche al nichel o al litio metallico è stato interrotto per problemi di sicurezza. Però, se utilizzato correttamente e in condizioni controllate il litio-ione è molto sicuro [1].

**6. Lunga vita operativa**

Le batterie devono mantenere delle prestazioni attendibili sia a temperature fredde che calde, tuttavia le temperature estreme influiscono sulla cinetica delle reazioni, sulla durata della batteria e sulla sicurezza [1].

### 7. **Bassa tossicità**

Le batterie al cadmio e al mercurio sono state sostituite con metalli alternativi per motivi ambientali. Quindi, risulta importante l'utilizzo di materiale non nocivi all'ambiente. Le soluzioni con nichel e litio, hanno portato un inferiore tossicità nella composizioni delle batterie, ma risultano ancora pericolose se non smaltite nel modo corretto [1].

### 8. **Rapidità di ricarica**

La possibilità di avere batterie che permettano una ricarica rapida senza compromettere l'integrità è molto importante. Le celle al litio e al nichel devono essere caricate a 1C o più lentamente. A 1C, una batteria al nichel ricarica in circa 90 minuti mentre una agli ioni di litio in 2-3 ore. Una batteria al piombo ha un tempo di ricarica di 8-16 ore. Tempi di ricarica rapida sono possibili per il nichel e il litio, ma le batterie devono essere progettate per questo scopo. La batteria al NiCd è la sola che accetta carica ultra-veloce con stress minimo, mentre in altre chimiche, una carica al di sopra di 1C provoca stress eccessivo [1].

In aggiunta a quanto detto, una batteria deve avere una bassa perdita spontanea di energia in assenza di carico (autoscarica) per permettere una lunga conservazione e fornire un rapido avvio quando necessario. Tutte le batterie subiscono delle perdite, e queste incrementano con la temperatura e l'invecchiamento. Le tecnologie che dominano il mercato delle batterie ricaricabili sono l'acido di piombo, il NiCd, il NiMH e gli ioni di litio [1]. Di seguito è presente un breve riassunto delle loro principali caratteristiche:

- **Acido di piombo**

Presenta una buona robustezza con alta tollerazioni di abusi ad un prezzo economico, ma con una bassa energia specifica e una durata di vita operativa bassa. In aggiunta, il piombo è un elemento tossico e non può essere smaltito facilmente [2].

- **Nickel-cadmio**

È la chimica più robusta e resistente con lunga vita operativa, alte correnti di scarica e resistenza a temperature estreme. Inoltre, ha la possibilità di utilizzare la ricarica ultra-rapida con stress minimi, ma data la tossicità della chimica il NiCd è stato rimpiazzato [2].

- **Nickel-metallo-idruro**

Le batterie NiMH sono state introdotte per sostituire il NiCd in modo da ridurre la tossicità dei materiali di utilizzo. Per di più, oltre alla riduzione di materiali tossici è stata raggiunta una maggiore energia specifica [2].

• **Ioni di litio**

Grazie alla loro alta densità energetica, bassa autoscarica e lunga vita operativa sta rimpiazzando le chimiche al piombo e al nichel. Tuttavia, è sensibile a condizione operative estreme e richiede un circuito di protezione che va ad aumentare il costo di utilizzo. Queste problematiche sono però ammortizzate dalle prestazioni e dalla durabilità della tecnologia [2].

La Figura 2.2 delinea una panoramica di comparazione tra le quattro chimiche di cella ricaricabile più utilizzate, considerando le prestazioni medie ai riferimenti più recenti.

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion <sup>1</sup>		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific energy (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–250	100–150	90–120
Internal resistance	Very Low	Very low	Low	Moderate	Low	Very low
Cycle life <sup>2</sup> (80% DoD)	200–300	1,000 <sup>3</sup>	300–500 <sup>3</sup>	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Charge time <sup>4</sup>	8–16h	1–2h	2–4h	2–4h	1–2h	1–2h
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Low. No trickle charge		
Self-discharge/month (room temp)	5%	20% <sup>5</sup>	30% <sup>5</sup>	<5% Protection circuit consumes 3%/month		
Cell voltage (nominal)	2V	1.2V <sup>6</sup>	1.2V <sup>6</sup>	3.6V <sup>7</sup>	3.7V <sup>7</sup>	3.2–3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20 typical Some go to higher V		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75V	1.00V		2.50–3.00V		2.50V
Peak load current Best result	5C <sup>8</sup> 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	2C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C (32 to 113°F)		0 to 45°C <sup>9</sup> (32 to 113°F)		
Discharge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	–20 to 65°C (–4 to 149°F)		–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
Maintenance requirement	3–6 months <sup>10</sup> (topping chg.)	Full discharge every 90 days when in full use		Maintenance-free		
Safety requirements	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection		Protection circuit mandatory <sup>11</sup>		
In use since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999
Toxicity	Very high	Very high	Low	Low		
Coulombic efficiency <sup>12</sup>	~90%	~70% slow charge ~90% fast charge		99%		
Cost	Low	Moderate		High <sup>13</sup>		

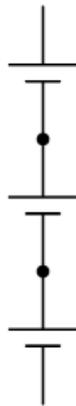
**Figura 2.2:** Caratteristiche delle batterie ricaricabili comunemente usate [2].

1. La combinazione con cobalto arriva ad una densità energetica di 250Wh/kg.

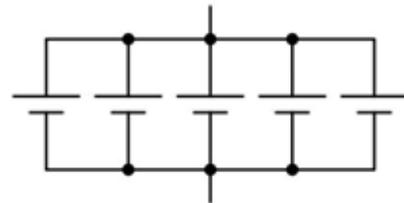
2. La durata dipende da quanto profondamente si scarica la cella. La profondità di scarica viene denominata DoD e tanto più è profonda maggiore è la durata del ciclo.
3. La durata del ciclo dipende da necessità di manutenzione della batteria, utile a ridurre l'effetto memoria. L'effetto memoria avviene con le celle al nichel poiché queste hanno memoria del livello raggiunto alla scarica precedente. Quindi, se la batteria venisse ricaricata spesso senza scaricarla completamente, si arriverebbe a una condizione in cui il limite di scarica non sarà più il minimo iniziale ma quello da cui la batteria è stata ricaricata (risultando in un invecchiamento precoce e in una minore capacità).
4. Le batterie a carica ultra rapida sono progettate per questo scopo ma volte ad impieghi speciali.
5. L'autoscarica è più alta immediatamente dopo la carica ed incrementa a temperature elevate o con l'inecchiamento. NiCd perde il 10% nelle prime 24 ore, poi diminuisce del 10% ogni 30 giorni.
6. Tradizionalmente la tensione nominale è di 1.25V ma 1.2V è un valore più comune.
7. La tensione nominale delle chimiche al litio vengono stimate in eccesso a causa del basso valore di resistenza interna.
8. Le celle al piombo possono generare picchi di corrente elevati ma hanno bisogno di un lungo riposo.
9. Le temperature di ricariche degli ioni di litio non devono essere al di sotto del congelamento a causa dell'influenza della temperatura sulla dinamica delle reazioni chimiche.
10. La manutenzione è eseguita tramite cariche di riempimento per evitare la solfatazione e conservare la capacità nel tempo.
11. Circuito di protezione utile a limitare le sovratensioni e le sottotensioni per garantire il un funzionamento corretto e sicuro.
12. L'efficienza di Coulomb risulta maggiore per tempi di ricarica più rapidi a causa della presenza di autoscarica.
13. Gli ioni di litio nonostante abbiano un costo maggiore, sopperiscono il maggior costo iniziale con la durata operativa e le prestazioni.

## 2.1 Celle elettrochimiche

Le celle costituiscono un elemento fondamentale nei sistemi di accumulo e distribuzione di energia elettrica per alimentare una vasta gamma di dispositivi. La capacità di una cella, misurata in Ah o mAh, indica la quantità di carica che può essere immagazzinata o successivamente rilasciata [3]. Il tasso di carica  $C$  (1C), invece, rappresenta la velocità con cui la cella può essere caricata o scaricata a corrente costante per un'ora. I dispositivi vengono alimentati dall'energia generata dalla cella che nasce da reazioni elettrochimiche. La capacità energetica nominale di una cella, espressa in Wh o kWh, è il risultato della sua tensione nominale moltiplicata per la capacità di carica nominale [3]. La potenza, con limitazioni dovute alla resistenza interna, indica la massima potenza che una cella può erogare e viene misurata in W. La potenza è tipicamente regolata attraverso limiti sulla tensione del terminale della cella [3]. Quando le celle sono collegate in serie, come mostrato nella Figura 2.3, la tensione totale della batteria è la somma delle tensioni delle singole celle, con una capacità di carica costante, poiché la corrente che attraversa tutte le celle è la stessa. Nel collegamento in parallelo (Figura 2.4), la tensione del pacco batteria rimane uguale alla tensione delle singole celle, ma la capacità di carica complessiva è pari alla somma delle capacità delle singole celle, poiché la corrente totale è la somma delle correnti delle singole celle [3].



**Figura 2.3:** Celle in serie [3]

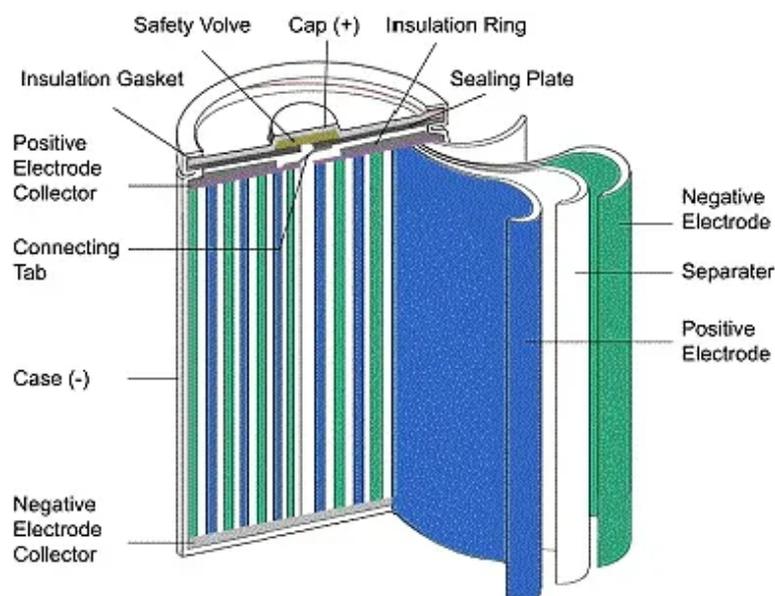


**Figura 2.4:** Celle in parallelo [3]

Due parametri chiave per rappresentare le prestazioni di una cella sono l'energia specifica e la densità di energia, le quali rappresentano rispettivamente la quantità massima di energia immagazzinata per unità di peso o volume [3]. Una cella con un'energia specifica più alta sarà più leggera per una determinata capacità di accumulo, mentre una cella con una maggiore densità energetica sarà più piccola per una data capacità di stoccaggio [3]. In generale, l'aumento della densità di energia e dell'energia specifica viene ottenuto utilizzando sostanze chimiche più reattive, anche se ciò può comportare una maggiore instabilità e la necessità di precauzioni più sofisticate in termini di sicurezza [3].

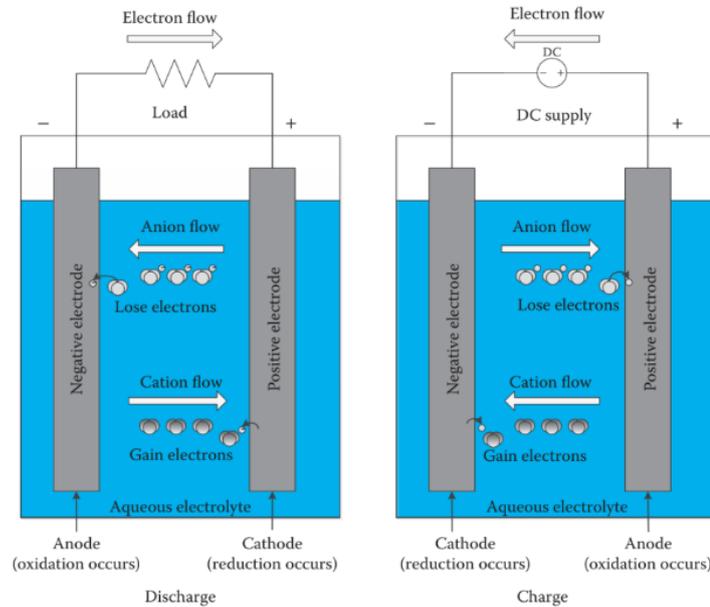
### 2.1.1 Principio di funzionamento

Una cella elettrochimica è composta da tre parti principali: un elettrodo positivo, un elettrodo negativo e un elettrolita. Gli elettrodi sono comunemente denominati anodo e catodo, il cui ruolo specifico varia a seconda che la cella sia in carica o scarica. Durante la scarica, il catodo è l'elettrodo dove il flusso di elettroni entra (corrente inferiore), mentre l'anodo è l'elettrodo dove la corrente elettrica aumenta (la densità di elettroni diminuisce) [4]. Durante la carica, il comportamento dei due elettrodi si inverte. Gli elettrodi sono immersi in una sostanza elettricamente isolante ma conduttrice di ioni che viene chiamata elettrolita. Gli elettroliti liquidi di solito contengono composti ionizzati in una soluzione acquosa, come l'acqua. Per aumentare la potenza e la densità di energia, gli elettrodi sono disposti il più vicino possibile l'uno all'altro; per prevenire cortocircuiti, è presente anche un separatore all'interno della cella. Il separatore è progettato specificamente per consentire il passaggio degli ioni. La corrente tra gli elettrodi avviene tramite elettroni esterni e ioni interni [4]. La Figura 2.5 mostra la struttura di una cella cilindrica agli ioni di litio.



**Figura 2.5:** Struttura cella agli ioni di litio [5].

Come mostrato nella Figura 2.6 durante la scarica della cella, gli elettroni fluiscono dall'elettrodo negativo attraverso il carico verso l'elettrodo positivo. Questo provoca un disallineamento di carica all'interno della cella, che viene compensato dagli ioni presenti nell'elettrolita. Gli anioni si spostano verso l'elettrodo negativo per donare elettroni in una reazione di ossidazione, mentre i cationi si spostano verso l'elettrodo positivo per accettare elettroni in una reazione di riduzione. Durante la carica, il processo è invertito.



**Figura 2.6:** Principio di funzionamento delle celle agli ioni di litio [5].

Poiché il trasporto di massa degli ioni non avviene istantaneamente, quando gli elettrodi vengono scollegati, gli ioni continuano a muoversi per bilanciare internamente la carica. Questo fenomeno contribuisce a un rilassamento della tensione ai terminali della cella. La velocità massima di deriva degli ioni è limitata, quindi la cella ha una resistenza interna non nulla. La quantità di energia che una cella elettrochimica può immagazzinare dipende dalla quantità di specie chimiche attive nell'elettrolita. La capacità di potenza della cella è determinata dall'area superficiale dell'interfaccia elettrodo/elettrolita. Perciò, una batteria di dimensioni finite ha una capacità e una velocità di alimentazione limitate dal suo design interno.

### 2.1.2 Formati di batterie

Le celle ricaricabili vengono proposte in diversi formati, ciascuno adatto ad un'applicazione specifica, con influenza su efficienza, densità energetica e la gestione termica. Le principali tipologie presenti sul mercato sono le seguenti:

- **Celle cilindriche:** sono caratterizzate da un'elevata densità di energia, che consente di immagazzinare significative quantità di energia in uno spazio compatto. Sono economiche grazie a processi produttivi consolidati, e vantano una dissipazione del calore efficiente grazie al loro design tubolare ma con una conduttività termica radiale che va a limitare il numero di avvolgimenti

e di conseguenza anche la capacità della cella [6]. La robustezza strutturale dell'involucro cilindrico conferisce durata e resistenza ai danni fisici. Inoltre, la loro forma facilita l'imballaggio e l'assemblaggio modulare nei dispositivi [6]. Tuttavia, la forma cilindrica potrebbe non essere adatta a progetti di dispositivi che richiedono fattori di forma specifici o flessibilità. La struttura dell'avvolgimento interno può essere suscettibile allo stress meccanico, influenzando le prestazioni a lungo termine. Questa tipologia di cella ha dimensioni standardizzate e codificate in maniera precisa, in base al diametro della cella. Nell'industria automobilistica, i veicoli elettrici utilizzano queste celle per le loro capacità di accumulo di energia e gestione termica. Inoltre, negli utensili elettrici, come trapani e seghe elettriche, la capacità di fornire alta potenza rende le celle cilindriche una buona scelta [6].

- **Celle prismatiche:** utilizzano un'approccio stratificato oppure altri modelli sono avvolti e appiattiti in un rotolo di gelatina pseudo-prismatica. Quest'ultime si trovano prevalentemente in telefoni cellulari, tablet e portatili a basso profilo che vanno da 800mAh a 4,000mAh. Non esiste un formato universale, perciò ogni costruttore può progettare il suo in base alle esigenze di progetto [6]. Le celle sono confezionate in alloggiamenti di alluminio saldati, forniscono capacità di 20-50Ah e sono utilizzate principalmente per i gruppi motopropulsori elettrici nei veicoli ibridi ed elettrici. Tra i vantaggi delle celle prismatiche vi sono l'ottimizzazione dello spazio e l'efficienza di imballaggio, che le rendono ideali per dispositivi con spazio interno limitato. Inoltre, la facilità di produzione, grazie alla sovrapposizione uniforme degli strati, contribuisce a semplificare le linee di produzione, riducendo complessità e costi [6]. La forma rigida limita la flessibilità di adattamento a spazi irregolari ma la struttura può essere più vulnerabile a stress meccanici o perforazioni, compromettendo la durabilità in condizioni operative difficili. Inoltre, la mancanza di standardizzazione tra i vari modelli di celle prismatiche rende difficile raggiungere processi di produzione automatizzati e uniformi. Le celle prismatiche sono utilizzate in elettronica di consumo, veicoli elettrici e sistemi di stoccaggio energetico stazionario, dove l'efficienza dello spazio e la facilità di assemblaggio possono fornire un vantaggio. Presentano sfide nella gestione termica a causa dell'assenza di spazi vuoti tra le celle nei pacchi batteria, e possono essere più costose da produrre [6].
- **Celle a sacchetto:** sono saldate agli elettrodi con delle lamine conduttive che sono state portate verso l'esterno in modo completamente sigillato. La cella a sacchetto offre una soluzione semplice, flessibile e leggera per il design della batteria. Si raccomanda una certa pressione della pila, ma occorre tener conto del gonfiore. Le celle a sacchetto possono fornire correnti di carico elevate, ma si comporta al meglio in condizioni di carico leggero e con ricarica

moderata [6]. La cella a sacchetto ha il più efficiente utilizzo dello spazio e raggiunge un'efficienza di imballaggio del 90-95%, la più alta tra le batterie. L'eliminazione del contenitore metallico riduce il peso, ma la cella ha bisogno di supporto e permesso di espandersi nel vano batteria. Le confezioni a sacchetto sono utilizzate in applicazioni di consumo, militari e automobilistiche. Non sono presenti dimensioni standard di cella ma ogni produttore progetta la forma più adatta ai requisiti di progetto [6]. I pacchi delle celle a sacchetto sono comunemente Li-polimero. Mentre i pacchetti più piccoli del sacchetto possono svilupparsi 8-10 per cento sopra 500 cicli, le grandi celle possono espandersi a quella dimensione in 5.000 cicli critepack. È meglio non impilare le cellule di sacchetto una sopra l'altro, ma metterli piatti, fianco a fianco con uno spazio maggiore in modo da non compromettere il sistema per colpa di eventuali rigonfiamenti. Il rigonfiamento estremo è una preoccupazione. Gli utenti delle celle a sacchetto hanno riferito fino al 3% di incidenti di gonfiamento in caso di lotti scadenti [6]. La pressione creata può rompere il coperchio della batteria e, in alcuni casi, rompere il display e le schede elettroniche. È importante interrompere l'uso e non forare una batteria gonfia in prossimità di calore o fuoco, dato che i gas che fuoriescono possono infiammarsi. Per ridurre le possibilità di rigonfiamento (causata spesso dai gas come diossido di carbonio e monossido di carbonio) sono stati progettati modelli più grandi. Le cellule a sacchetto sono prodotte aggiungendo una "gasbag" temporanea sul lato [6]. I gas fuoriescono nel sacco formando l'interfaccia elettrolitica solida (SEI) durante la prima carica. Il sacchetto di gas viene tagliato e la confezione viene risigillata come parte del processo di finitura. Formare un solido SEI è fondamentale per le buone pratiche di progettazione. Le cariche successive dovrebbero produrre un minimo di gas, tuttavia la produzione di gas (denominata gassazione) non può essere completamente evitata. È causata dalla decomposizione dell'elettrolita ottenuta dall'uso e dall'invecchiamento. Le sollecitazioni, quali il sovraccarico ed il surriscaldamento promuovono la gassificazione. Una cella gonfia con un utilizzo normale spesso suggerisce un lotto difettoso [6].

### 2.1.3 Condizioni operative pericolose

Le batterie agli ioni di litio nonostante possiedano elevata energia specifica e densità energetica, necessitano di attenzione sulle temperature di utilizzo e condizioni estreme. Per conservare la loro durabilità e la completezza della capacità disponibile è fondamentale evitare condizioni di sovraccarica, sovraccarica o di utilizzare correnti troppo elevate. Le celle agli ioni di litio possono subire danni tramite utilizzi elettronici scorretti . Tra questi vi sono:

### Abuso elettrico

- **Sovraccarica:** Quando la tensione di una cella in fase di carica supera il limite stabilito (tipicamente al di sopra di 4.2 V) oppure quando viene fatta passare troppa corrente si verifica il fenomeno della sovraccarica. Utilizzare una cella agli ioni di litio in queste condizioni porta ad una significativa degradazione degli elettrodi, con conseguente deposizione degli ioni di litio sulla superficie dell'elettrodo come litio metallico, questo processo viene denominato plating [7]. Oltre a ridurre la capacità della batteria questo fenomeno può provocare la formazione di dendriti, i quali crescendo potrebbero perforare il separatore e dunque creare dei cortocircuiti interni che conducono a problemi di sicurezza. Inoltre, questo eccesso di carica porta ad un aumento di temperatura dell'elettrolita, aumentando il rischio di innesco del fenomeno di runaway termico, che si può diffondere in tutto il modulo in caso di sistemi più grandi [7].
- **Sovra-scarica:** Quando la tensione scende al di sotto di una certa soglia minima (tipicamente 2 V) si parla di sovra-scarica. Le conseguenze immediate di una semplice sovra-scarica non causano gravi danni: all'anodo si può avere la dissoluzione del collettore di corrente in rame nell'elettrolita [7]. Tuttavia, quando la tensione ritorna a valori superiori alla soglia, gli ioni di rame dispersi nell'elettrolita potrebbero andare a depositarsi su qualsiasi superficie come rame metallico, con possibile generazione di micro-cortocircuiti, i quali possono generare il fenomeno di runaway termico. Per evitare che si verifichino queste condizioni sono presenti dei dispositivi con circuiti di protezione adibiti a disconnettere la carica elettrica e bloccare la sovra-scarica [7].
- **Cortocircuito interno:** Tra i meccanismi più frequenti che accadono alle batterie agli ioni di litio è presente il cortocircuito, dovuto a danni di tipo meccanico o a fenomeni precedentemente descritti come il plating o la dissoluzione del collettore in rame. Questo meccanismo è uno dei più pericolosi perché porta ad incidenti gravi (incendio o esplosione), a causa di reazioni esotermiche incontrollate che conducono al runaway termico [7].

### Abuso termico

Le batterie ricaricabili agli ioni di litio, così come altri tipi di batterie, hanno bisogno di rispettare dei range operativi di temperatura affinché possano operare in modo sicuro e durevole.

- **Alta temperatura:** L'elevata temperatura, come già fatto presente nella panoramica delle chimiche di batteria, è una delle cause di eventi gravi e distruzione della cella. Può essere generata sia da un flusso di calore interno

come nel cortocircuito ma non solo, oppure da flussi di calore esterni che non riescono a essere dispersi nel caso di grandi pacchi [7]. Queste cause conducono tutte al fenomeno del runaway termico, che può essere limitato tramite l'isolamento modulare possibile grazie ad un'opportuna separazione tra i diversi moduli e tra le diverse celle di un modulo [7].

- **Bassa temperatura:** E' una condizione termica meno grave, in quanto comporta un rallentamento nella dinamica delle reazioni elettrochimiche e la contrazione dei materiali che costituiscono gli elettrodi: questo rende molto complicato l'inserimento degli ioni di litio con la conseguenza di avvenimento del fenomeno di plating del litio nell'anodo e una perdita di capacità non reversibile[7].

#### 2.1.4 Modellizzazione della cella

Per poter simulare il comportamento delle batterie sono stati sviluppati vari tipi di modelli, adattati a precise funzionalità del sistema per cui si necessita eseguire la simulazione o la stima [8]. I modelli elettrochimici sono principalmente utilizzati per ottimizzare la progettazione fisica delle celle, analizzare i meccanismi fondamentali di generazione dell'energia e mettere in relazione i parametri progettuali con le grandezze misurabili sia a livello macroscopico (come tensione e corrente) sia microscopico (come la distribuzione della concentrazione degli ioni) [8]. Tuttavia, questi modelli risultano particolarmente complessi: richiedono la risoluzione di sistemi di equazioni tempo-varianti, spaziali e parziali accoppiate, questo comporta tempi di simulazione molto lunghi, l'impiego di algoritmi numerici avanzati e la conoscenza di dati specifici della batteria, spesso difficili da ottenere a causa della natura della tecnologia [8]. I modelli matematici, invece, hanno un livello di astrazione che riduce la correlazione con la fisica interna della cella. Nonostante non siano sempre utilizzabili, rappresentano un riferimento per chi progetta il sistema. Questi modelli si basano su formule empiriche o metodi matematici, per prevedere comportamenti globali della batteria, come la durata operativa, l'efficienza o la capacità [8]. Inoltre, la maggior parte dei modelli matematici funzionano solo per applicazioni specifiche e forniscono risultati imprecisi nell'ordine del 5-20% di errore [8]. I modelli elettrici, con accuratezza compresa tra quella dei modelli elettrochimici e di quelli matematici, sono modelli elettrici equivalenti che utilizzano combinazioni di sorgenti di tensione, resistori e condensatori [8]. Sono stati creati molti modelli elettrici di batterie, da piombo-acido alle batterie litio-ione. La maggior parte di questi modelli elettrici rientra in tre categorie di base: Thevenin, modelli basati sull'impedenza e modelli basati su tempo reale [8].

- **Modello elettrico Thevenin**

Nella sua versione basilare, il modello di Thevenin, illustrato in Figura 2.7,

utilizza un resistore in serie e una rete RC per descrivere la risposta della batteria ai transitori di carico a un dato stato di carica (SOC), assumendo una tensione a circuito aperto (OCV) costante. Tuttavia, considerare una OCV costante porta ad una limitazione nel rappresentare precisamente le risposte stazionarie e le dinamiche in tempo reale della tensione [8]. Sono state sviluppate diverse varianti di modello, che cercano di andare oltre questo limite di valutazione delle risposte stazionarie e in tempo reale [8]. Alcuni modelli, ad esempio, sostituiscono la funzione  $V_{OC}(SOC)$  con un condensatore a capacità variabile per rappresentare la relazione non lineare tra OCV e SOC, richiedendo un'integrazione sulla tensione per stimare lo stato di carica e introducendo un errore del 5% nel tracciamento dell'SOC e fino a 0.4 V sulla tensione sotto correnti costanti di carica/scarica [8]. Altri modelli si concentrano sulla caratterizzazione della dipendenza non lineare tra OCV e SOC, ma trascurano la risposta transitoria, oppure necessitano di equazioni matematiche aggiuntive per stimare lo stato di carica in tempo reale [8]. Alcune implementazioni adottano due reti RC parallele a parametri costanti, risultando però valide solo per specifiche condizioni di SOC e temperatura [8]. Altre ancora impiegano reti elettriche complesse, derivate da processi fisici, per modellare l'OCV, aumentando notevolmente la complessità del modello. Pertanto, nessuno di questi modelli basati su Thevenin è in grado di prevedere l'autonomia della batteria in modo semplice e accurato nei simulatori di circuiti [8].

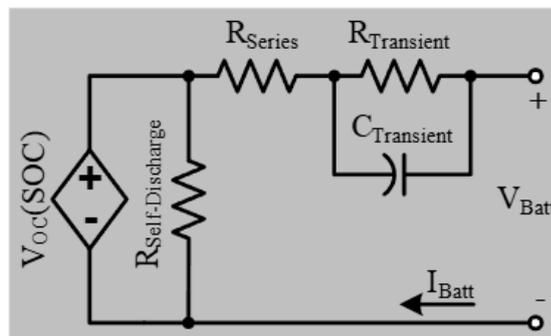
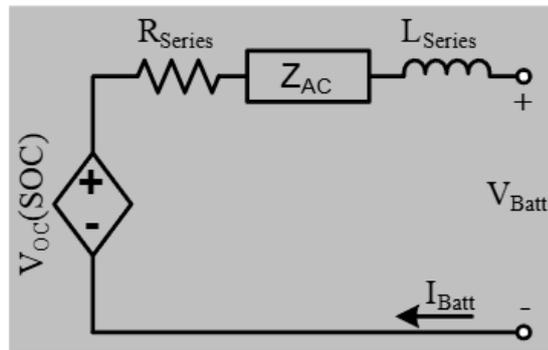


Figura 2.7: Thevenin [8]

- **Modello elettrico basato sull'impedenza**

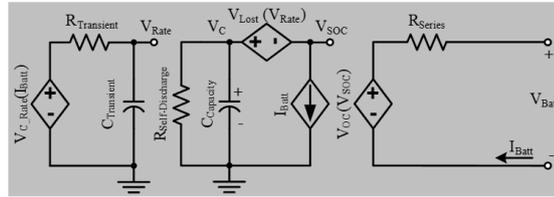
I modelli basati sull'impedenza, mostrato in Figura 2.8, utilizzano delle misure spettrali elettrochimiche e reti complesse ( $Z_{AC}$ ) utili ad adattare lo spettro di impedenza per poter modellizzare l'impedenza equivalente AC in frequenza, [8]. Inoltre, i modelli basati sull'impedenza non possono stimare la risposta DC o in tempo reale, perché funzionano solo per un'impostazione fissa dello SOC e della temperatura [8].



**Figura 2.8:** Modello basato sull'impedenza [8]

- **Modello elettrico basato sull'esecuzione in tempo reale**

I modelli basati sull'esecuzione in tempo reale, mostrati in Figura 2.9, utilizzano una rete di circuiti complessa per simulare la risposta in tempo reale e in DC della batteria con una corrente di scarica costante [8].



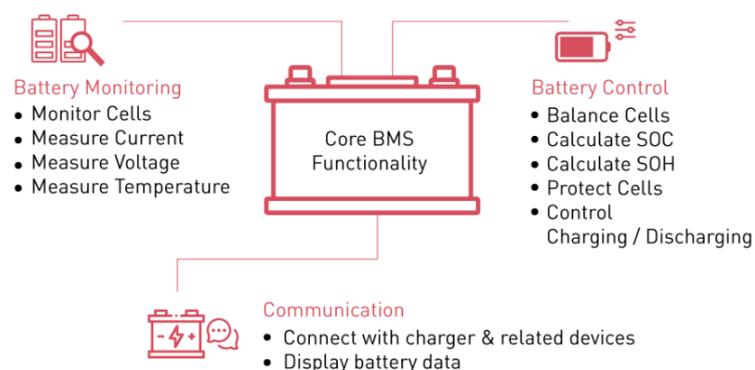
**Figura 2.9:** Modello basato sull'esecuzione in tempo reale [8]

## Capitolo 3

# Battery Management System

Le batterie ricaricabili rappresentano un nuovo metodo innovativo per immagazzinare e utilizzare l'energia, ma con delle fragilità che limitano la sicurezza, l'efficienza e la vita operativa. Se sottoposte a sovraccarico o sovrascarica, le celle subiscono danni irreversibili e se alcune celle di un pacco si scaricano più rapidamente di altre, l'intero modulo subirà il danno con una conseguente vita operativa inferiore; le temperature fuori controllo (al di fuori dal range operativo), possono generare reazioni termiche che accelerano il degrado o persino innescano reazioni a catena pericolose [9]. Inoltre, senza avere una sistema che monitori i principali parametri di cella è complesso stimare la carica rimanente e l'invecchiamento. Proprio per superare queste criticità sono nati i Battery Management System [9].

### 3.1 Principali parametri di controllo



**Figura 3.1:** Funzionalità di un BMS [10]

I BMS sono essenziali per garantire le migliori prestazioni dei pacchi batteria. Questo obiettivo viene raggiunto eseguendo diverse funzioni, come il monitoraggio, la protezione, il bilanciamento e la segnalazione. Le prestazioni, la longevità e la sicurezza dei sistemi di batterie sono garantite da ciascuna di queste funzioni [10].

### **Monitoraggio**

Il monitoraggio rappresenta un'operazione fondamentale nei BMS, dal momento che permette di controllare e gestire una batteria. I parametri fondamentali da monitorare costantemente sono la tensione, la corrente e la temperatura. Questi, sono utili a garantire che ogni cella, modulo o pacco rientri nei range operativi stabiliti dalla chimica e per poter fornire stime su stato di carica (SOC) e stato di salute (SOH). Perciò la funzione del monitoraggio è importantissima per garantire la durabilità e le prestazioni del sistema. [10].

### **Protezione**

Una delle principali responsabilità di un sistema di gestione della batteria (BMS) è quella di proteggere la batteria e il sistema nel suo complesso da condizioni che potrebbero potenzialmente dannose o presentare rischi per la sicurezza [10]. Il BMS implementa azioni protettive per contrastare scenari come sovraccarico, scarica profonda, sovracorrente, cortocircuiti e surriscaldamento. Ad esempio, se la tensione ai capi di una cella supera una soglia specifica, indicando un sovraccarico, il BMS può scollegare il circuito di carica o deviare la corrente per impedire l'ulteriore carica di quella specifica cella [10].

### **Bilanciamento**

Un compito essenziale di un BMS è il bilanciamento, il quale garantisce uno stato di carica (SOC) uniforme tra tutte le celle di un pacco batteria. In una configurazione in serie, anche lievi differenze nelle capacità o nell'impedenza delle singole celle possono portare a squilibri nel tempo [10]. Il bilanciamento può essere realizzato con metodi passivi o attivi. Il bilanciamento passivo comporta la dissipazione dell'energia in eccesso sotto forma di calore nelle celle con un SOC elevato, mentre il bilanciamento attivo comporta il trasferimento di carica dalle celle con livelli di carica maggiore a quelle con livelli più bassi [10]. Questo processo garantisce che il pacco batteria possa utilizzare l'intera capacità e contribuisce a prolungarne la durata complessiva [10].

## Segnalazione

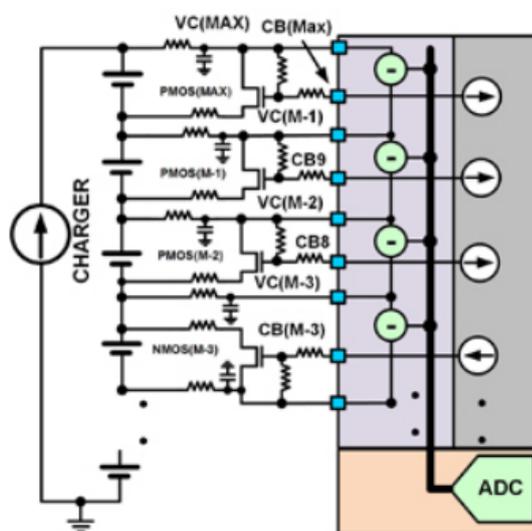
La segnalazione include la trasmissione di dati e informazioni pertinenti all'utente o ad altri sistemi. Un BMS trasmette dati importanti, utili a stimare SOC, SOH ed eventuali circostanze di guasto. Questi dati possono essere utilizzati per fornire dati ad altri sistemi per il controllo e il processo decisionale, nonché per informare l'utente sulle condizioni attuali della batteria. Ad esempio, nei veicoli elettrici, il BMS interagisce con l'unità di controllo centrale (Energy Management System) per fornire dati sulle condizioni del pacco batteria, che potrebbero influire sul funzionamento del veicolo [10].

### 3.1.1 Controllo della tensione

Monitorare la tensione di ciascuna cella all'interno di un pacco batteria è essenziale per determinarne lo stato di salute complessivo. Ogni cella possiede una finestra di tensione operativa entro cui devono avvenire la carica e la scarica, per garantire un funzionamento corretto e una lunga durata della batteria. Se una batteria utilizza una chimica al litio, la tensione operativa tipicamente varia tra 2,5V e 4,2V. Questo intervallo dipende dalla chimica utilizzata. Lavorare con la cella al di fuori di questo intervallo di tensione operativo può accelerare i processi di invecchiamento o causare danni irreversibili, che potrebbero limitare fortemente l'utilizzo della batteria. Le celle vengono collegate in serie e in parallelo per formare un pacco batteria. Il collegamento in parallelo aumenta la capacità di corrente erogabile del pacco, mentre il collegamento in serie ne incrementa la tensione complessiva. Come tutti i prodotti industriali, anche le tensioni delle celle presentano una variabilità: inizialmente, al tempo zero, le celle all'interno del pacco si caricano e scaricano con le stesse velocità. Tuttavia, con il tempo e i cicli di carica/scarica, la velocità di carica e scarica di ogni cella cambia, provocando una distribuzione non uniforme delle prestazioni nel pacco batteria.

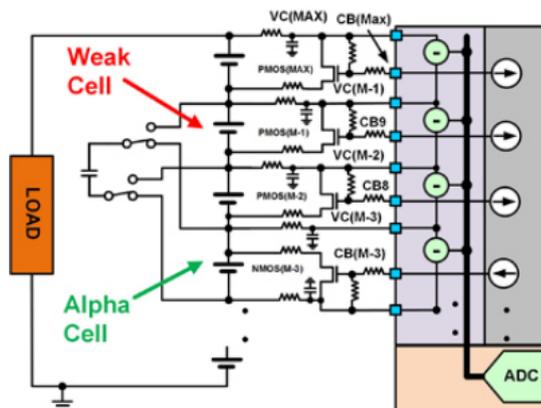
Un metodo semplice per determinare se un pacco batteria è completamente carico consiste nel monitorare la tensione di ciascuna cella fino al raggiungimento di un livello prefissato. La prima cella che raggiunge il limite di tensione imposta determina che il pacco è considerato carico. Tuttavia, se nel pacco è presente una cella più debole della media, essa raggiungerà il limite per prima, lasciando le altre celle non completamente cariche. Uno schema di carica come quello descritto non massimizza il tempo di funzionamento del pacco batteria per ogni ciclo di carica. Inoltre, riduce la vita utile del pacco, poiché sono necessari più cicli di carica e scarica. Una cella più debole tende a scaricarsi più velocemente. Lo stesso tipo di situazione si verifica durante il ciclo di scarica. La cella più debole raggiunge per prima il limite minimo di scarica, lasciando le altre celle con carica residua. Esistono due modi per migliorare il tempo di funzionamento di un pacco batteria per ogni ciclo di carica. Il primo consiste nel rallentare la carica ricevuta dalla cella

più debole durante il ciclo di ricarica. Questo si ottiene collegando un transistor FET di bypass con una resistenza limitatrice di corrente in parallelo alla cella. In questo modo parte della corrente viene deviata dalla cella con la corrente più alta, rallentandone la carica e permettendo alle altre celle del pacco di raggiungerla. L'obiettivo finale è massimizzare la capacità di carica del pacco batteria, facendo sì che tutte le celle raggiungano contemporaneamente il livello di carica completa [11].



**Figura 3.2:** I FET di bilanciamento delle celle in bypass vengono utilizzati per rallentare la velocità di carica di una cella durante il ciclo di carica [11]

Il pacco batteria può essere bilanciato anche durante la scarica attraverso un sistema di spostamento della carica (charge displacement). Questo consiste nel prelevare carica, tramite accoppiamento induttivo o stoccaggio capacitivo, dalla cella più forte (alpha cell) e iniettarla nella cella più debole. In questo modo si rallenta il tempo con cui la cella debole raggiunge il limite di scarica. Questo metodo è noto come bilanciamento attivo [11].

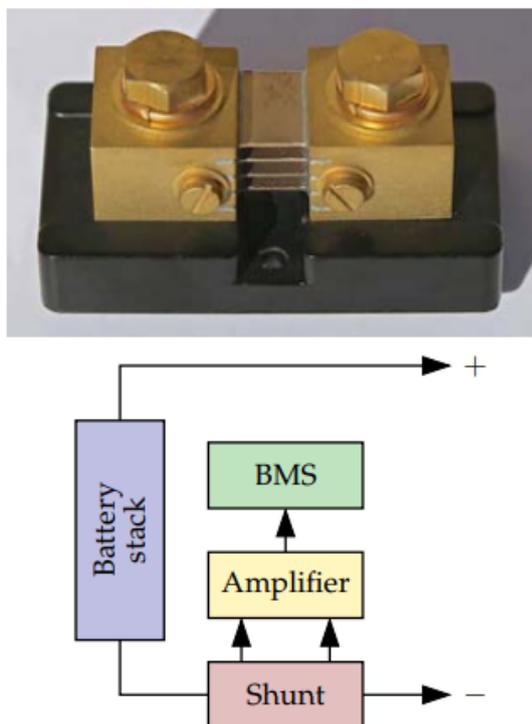


**Figura 3.3:** Il bilanciamento attivo viene utilizzato durante il ciclo di scarica per prelevare carica da una cella forte e trasferirla a una cella debole [11]

I pacchi batteria costituiti da una a quattro celle in parallelo e da tre o più celle in serie traggono il maggior beneficio dal bilanciamento. Con l'aumentare delle celle in parallelo per ogni ramo, le prestazioni della cella debole vengono "mediate" con quelle delle altre, riducendo la dispersione delle prestazioni tra le celle. Tuttavia, più celle in parallelo significa anche maggiore difficoltà nell'individuare la cella debole, poiché il suo comportamento viene mascherato da quello delle celle più forti. Un pacco batteria a riposo potrebbe consumare energia perché le celle più forti mantengono attiva quella più debole [11].

### 3.1.2 Controllo della corrente

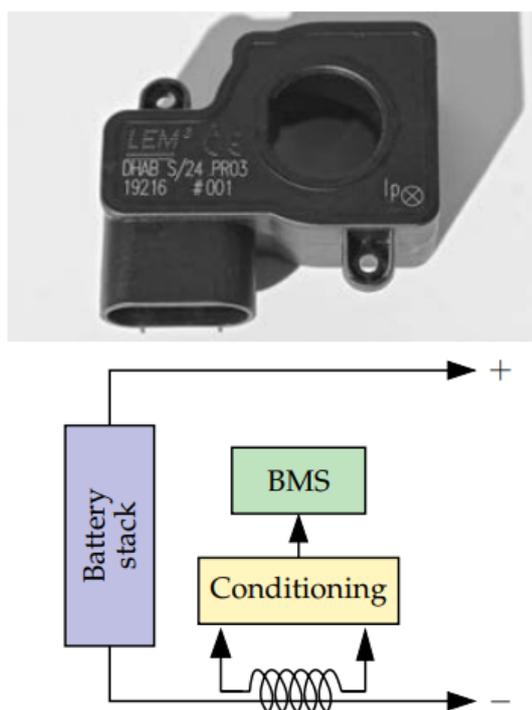
Un BMS deve misurare la corrente del pacco batterie. In parte, questo serve a rilevare e registrare le condizioni di abuso e a garantire la sicurezza. Tuttavia, la corrente della batteria è anche un input critico per la maggior parte degli algoritmi di stima di SOC e SOH. Esistono due elementi elettronici di base che possono essere utilizzati in un circuito per rilevare la corrente: i current-shunt e i sensori a effetto Hall. Un current-shunt è un resistore tipicamente di basso valore (es.  $0,1 \text{ m}\Omega$  [12]) ad alta precisione posto di solito in serie al terminale negativo del pacco batteria. La caduta di tensione  $v_{shunt}$  attraverso la resistenza di shunt  $R_{shunt}$  viene misurata utilizzando un convertitore analogico-digitale e la corrente viene calcolata come  $i = v_{shunt}/R_{shunt}$ . Poiché la resistenza di shunt deve essere piccola (per evitare grandi perdite di potenza dovute al riscaldamento  $\rightarrow i^2 R_{shunt}$ ), anche la caduta di tensione attraverso lo shunt sarà piccola. Pertanto, la tensione viene solitamente amplificata prima del rilevamento e il calcolo della corrente è regolato di conseguenza [12].



**Figura 3.4:** Rilevamento della corrente con shunt [12]

La Figura 3.4 mostra una fotografia di uno shunt di corrente ( riquadro in alto) e uno schema a blocchi per il rilevamento della corrente con uno shunt di corrente ( riquadro in basso). Esaminando il derivatore di corrente in modo più dettagliato, si nota che sono presenti quattro terminali di collegamento. I terminali grandi sulla parte superiore del dispositivo servono per il collegamento ai fili principali di trasporto della corrente del pacco batterie: un lato è collegato al terminale negativo della pila e l'altro lato è collegato al terminale negativo di uscita del pacco batterie. L'intera corrente del pacco batterie passa quindi attraverso le piastre parallele che formano la resistenza calibrata nel centro dello shunt, tra questi terminali grandi. In particolare, viene calibrata la resistenza tra i due terminali a vite più piccoli e tra questi vengono collegati i cavi di rilevamento. Questo schema è chiamato connessione Kelvin e consente la misurazione della tensione a quattro fili. Poiché la corrente assorbita dall'elettronica di rilevamento della tensione è sostanzialmente nulla, la caduta di tensione sulla resistenza dei terminali più piccoli è trascurabile e la corrente può essere calcolata come indicato in precedenza. Tuttavia, se si dovessero (erroneamente) collegare i fili di rilevamento della tensione ai terminali a vite più grandi, la caduta di tensione della corrente del pacco batteria che passa attraverso la resistenza non calibrata dei terminali a vite grandi degraderebbe significativamente l'accuratezza del calcolo della corrente. Il vantaggio principale

degli shunt di corrente (rispetto ai sensori a effetto Hall, descritti di seguito) è che non hanno offset a corrente zero, indipendentemente dalla temperatura. Questo è di vitale importanza se si aggiorna una stima del SOC integrando la corrente in entrata e in uscita da un pacco batteria (questo è noto come conteggio di coulomb). Tuttavia, l'elettronica di amplificazione e di misura può introdurre un offset, che deve essere calibrata dopo ogni misura. Uno svantaggio nell'uso degli shunt è che di solito devono essere isolati elettricamente dal circuito principale del BMS (ad esempio, in un'applicazione automobilistica, il BMS è alimentato tramite un'alimentazione esterna a 12 V che deve essere isolata dalla batteria ad alta tensione). Questo, insieme al circuito di amplificazione, aggiunge complessità al progetto. Anche la resistenza dello shunt di corrente cambia con la temperatura, pertanto è necessario misurare la temperatura e calibrare la resistenza. Inoltre, lo shunt stesso introduce alcune perdite di energia e il calore generato deve essere dissipato attraverso il sistema di gestione termica. Se una bobina è avvolta attorno a un conduttore primario portatore di corrente, il campo elettromagnetico prodotto dal conduttore induce una corrente secondaria nella bobina. I sensori a effetto Hall misurano questa corrente indotta per dedurre la corrente primaria [12].



**Figura 3.5:** Rilevamento della corrente con sensore a effetto Hall [12]

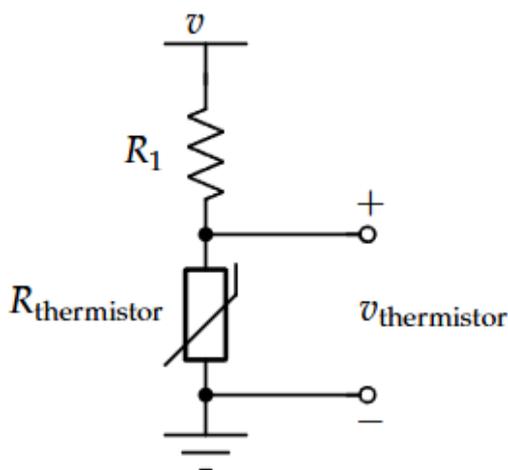
La Figura 3.5 mostra una fotografia di un sensore a effetto Hall (riquadro superiore) e uno schema a blocchi per il rilevamento della corrente con un sensore a effetto Hall (riquadro inferiore). Il filo portante della batteria passa attraverso l'apertura ovale al centro del sensore; non viene effettuato alcun collegamento elettrico diretto tra il sensore e la batteria ad alta tensione. Ciò comporta il netto vantaggio che i sensori a effetto Hall sono automaticamente isolati elettricamente dalla batteria ad alta tensione e quindi non è necessario alcun circuito di isolamento speciale. Tuttavia, poiché i sensori a effetto Hall funzionano in base a principi elettromagnetici, l'isteresi magnetica è intrinseca al dispositivo. Per evitare questa isteresi, è possibile creare un circuito di condizionamento del segnale di retroazione, e alcuni sensori vengono forniti già preconfezionati con tale circuito. Tuttavia, i sensori basati sull'effetto Hall sono soggetti a un certo offset di misura quando non scorre corrente, il quale oscilla nel tempo e con la temperatura. Anche se questo offset viene azzerato nel software (da sottraendo una misura iniziale) a una certa temperatura iniziale durante una routine di avvio del BMS (quando è noto che scorre corrente zero poiché i contattori non sono ancora chiusi), questa calibrazione ad hoc non corregge la deriva del bias che varia nel tempo e nella temperatura. Poiché il bias interferisce con diversi algoritmi del BMS, è necessaria una sorta di compensazione. Ad esempio, se il BMS sa con certezza che sta scorrendo corrente zero, il bias può essere azzerato a quei tempi [12].

### 3.1.3 Controllo della temperatura

Il BMS è essenziale per controllare la temperatura all'interno della batteria. Aiuta a prevenire il surriscaldamento, uno scenario che potrebbe portare a una riduzione della durata della batteria o persino al collasso termico, monitorando la temperatura e impiegando tecniche di raffreddamento se necessario. Una situazione pericolosa nota come fuga termica si verifica quando un picco di temperatura provoca ulteriori aumenti della temperatura, i quali potrebbero comportare una risposta incontrollabile e distruttiva [13]. Oppure, per basse temperature si può osservare un incremento della resistenza e un rallentamento dei processi chimici. Quindi, è importante conoscere la temperatura della cella in modo da poter predire le prestazioni della cella nel futuro prossimo. Inoltre, i meccanismi di degradazione dipendono anche dalla temperatura: in generale, le alte temperature accelerano i tassi di degradazione, anche se la ricarica di un pacco batteria a basse temperature può anche portare ad un guasto prematuro attraverso la placcatura di litio. Per quanto l'ideale sarebbe misurare la temperatura interna di ogni cella, nella realtà all'interno delle celle non sono integrati dei sensori di temperatura interni, quindi ci dobbiamo affidare alla misura della temperatura esterna. Inoltre, poiché vi è un costo per ogni sensore, si vorrebbe ridurre al minimo il numero totale di sensori richiesti. Con un modello termico accurato del pacco, possiamo posizionare un

numero limitato di sensori di temperatura esterni ad una o più celle di un modulo per poi stimare la temperatura interna di tutte le celle. Ma, come misuriamo la temperatura? Per misurare qualsiasi semplice quantità fisica elettronicamente, dobbiamo prima rappresentare quella quantità come segnale di tensione e quindi misurare la tensione tramite un circuito convertitore analogico-digitale. Ci sono due approcci primari per poter misurare la temperatura.

La prima consiste nell'utilizzare una termocoppia, un dispositivo composto da due metalli dissimili in contatto tra loro che agisce come una batteria in miniatura. Quando la temperatura della termocoppia è diversa da quella di riferimento in un'altra parte del circuito di misura, si produce una tensione molto piccola, che dipende dall'entità della differenza di temperatura. La tensione della termocoppia può essere amplificata e misurata e la temperatura può essere calcolata da questa misura. Una sfida progettuale nell'uso delle termocoppie è che la temperatura di riferimento deve essere nota in modo indipendente o misurata, il che probabilmente rende le termocoppie più adatte per i test di laboratorio e non per i progetti di BMS di produzione. Il secondo metodo utilizza un termistore ed è probabilmente più adatto all'uso in prodotti commerciali. Tutti i resistori hanno un valore che varia in qualche modo con la temperatura, ma di solito sono progettati per minimizzare questa variazione. Un termistore, invece, è progettato per massimizzare e capitalizzare la variazione di temperatura. I termistori a coefficiente negativo di temperatura (NTC) hanno una resistenza che varia inversamente alla temperatura, mentre i termistori a coefficiente positivo di temperatura (PTC) hanno una resistenza che varia direttamente con la temperatura. Se riusciamo a misurare la resistenza del termistore, possiamo dedurre la temperatura [12].



**Figura 3.6:** Circuito partitore di tensione [12]

Per misurare la resistenza, possiamo utilizzare un partitore di tensione, come quello mostrato in Figura 3.6. Nel circuito, il resistore  $R_1$  ha una resistenza che non varia in modo apprezzabile con la temperatura, ma il resistore  $R_{thermistor}$  ha un valore progettato per variare significativamente con la temperatura. Calcoliamo la corrente globale come

$$i = \frac{v}{R_1 + R_{thermistor}} \quad (3.1)$$

Quindi, notiamo che la tensione misurata è  $v_{thermistor} = iR_{thermistor}$  o

$$v_{thermistor} = \frac{R_{thermistor}}{R_1 + R_{thermistor}}v \quad (3.2)$$

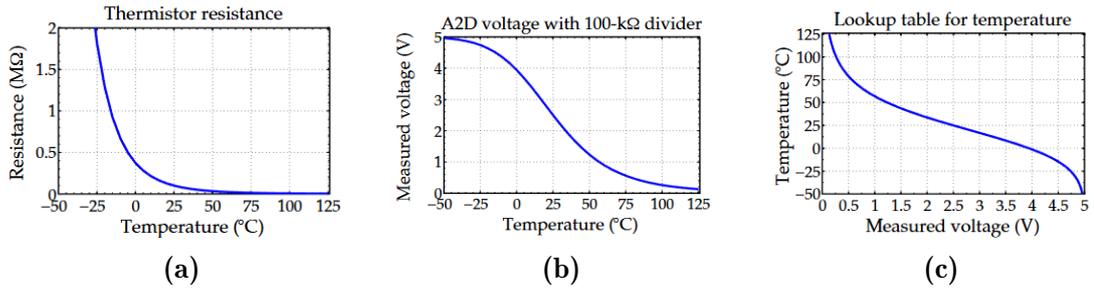
Il valore  $R_1$  è progettato per limitare la perdita di potenza attraverso il circuito di misura, ma allo stesso tempo fornire un intervallo utile di misura per  $v_{thermistor}$ . Se misuriamo  $v_{thermistor}$  e conosciamo i parametri di progettazione del circuito, possiamo calcolare

$$R_{thermistor} = \frac{v_{thermistor}}{v - v_{thermistor}}R_1 \quad (3.3)$$

La scheda tecnica del termistore darà un'espressione che relaziona  $R_{thermistor}$  e la temperatura. Per esempio, una relazione rappresentativa è

$$R_{thermistor} = R_0 \exp\left(\beta\left(\frac{1}{273.15 + T} - \frac{1}{273.15 + T_0}\right)\right) \quad (3.4)$$

in cui la temperatura misurata è indicata come  $T$  e la resistenza nominale alla temperatura di riferimento  $T_0$  è indicata come  $R_0$ ; le temperature sono convertite da Celsius a Kelvin aggiungendo 273.15, e  $\beta$  è un parametro del dispositivo.



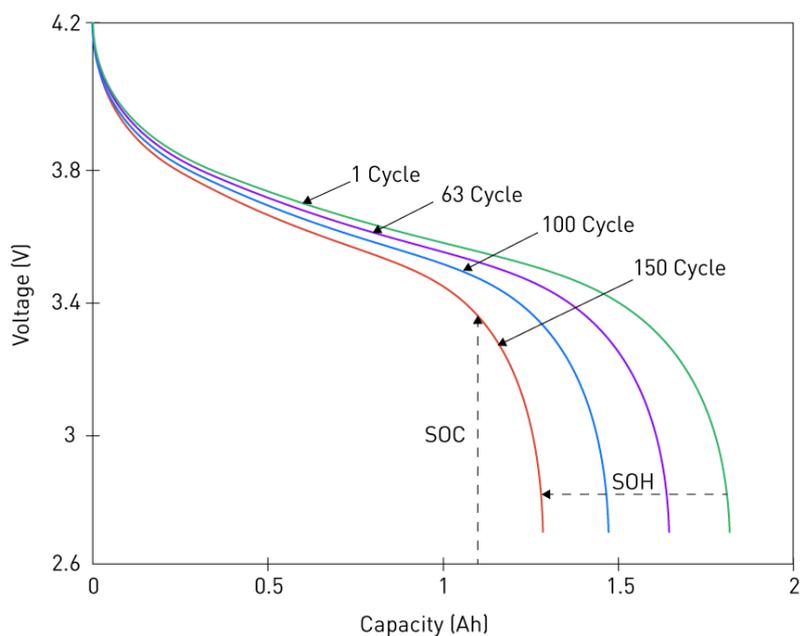
**Figura 3.7:** Esempio di utilizzo di un termistore [12]

La Figura 3.7a mostra la resistenza del termistore per un dispositivo NTC che ha  $R_0 = 100k\Omega$  a  $T_0 = 25^\circ C$  e  $\beta = 4282$ . Se questo dispositivo fosse posizionato nel lato inferiore di un partitore di tensione con una sorgente di 5V e un  $R_1 =$

$100k\Omega$ , si dovrebbe misurare una tensione del termistore  $v_{thermistor}$  in funzione della temperatura come quella in Figura 3.7b. Tramite l'Equazione 3.3 si potrà calcolare la resistenza del termistore ed in seguito anche la temperatura risolvendo l'Equazione 3.4 per il valore della resistenza. Per un calcolo efficiente in un BMS integrato, la relazione globale tra la tensione misurata e la temperatura può essere precalcolata e memorizzata in una lookup table. Un esempio di questo risultato è mostrato nella Figura 3.7c [12].

## 3.2 Stima degli stati della batteria

Lo stato di carica (SOC) e lo stato di salute (SOH) sono due fattori critici nel mondo delle batterie ricaricabili che sono estremamente importanti per determinare le prestazioni e la longevità della batteria. Il sistema di gestione della batteria (BMS), che monitora e controlla questi parametri, fornisce informazioni cruciali sulla capacità e sullo stato della batteria, assicurando un funzionamento sicuro ed efficace [14]. Un'illustrazione comune dell'impatto di SOC e SOH per una batteria è mostrata nel diagramma seguente:



**Figura 3.8:** SOC and SOH effects of a battery [14]

L'SOC aumenta con una maggiore tensione della batteria e diminuisce man mano che la batteria si esaurisce. Lo SOH, o più semplicemente, la durata della

batteria, diminuisce con l'aumento del numero di cicli di carica e scarica [14].

### 3.2.1 Stima dello stato di carica (SOC)

Il parametro SOC può essere considerato una grandezza termodinamica che consente di valutare l'energia potenziale di una batteria o la percentuale di energia che essa contiene rispetto alla sua capacità totale. Poiché la determinazione del SOC di una batteria è un'attività complessa che dipende dal tipo di batteria e dall'applicazione in cui viene utilizzata, negli ultimi anni sono stati condotti numerosi studi e ricerche per migliorare l'accuratezza della stima del SOC. Una stima accurata del SOC è uno dei compiti principali dei sistemi di gestione della batteria, che contribuirà a migliorare le prestazioni e l'affidabilità del sistema e a prolungarne la durata. Infatti, una stima precisa del SOC della batteria può evitare interruzioni impreviste del sistema e impedire che le batterie vengano sovraccaricate o scaricate eccessivamente, con conseguenti danni permanenti alla struttura interna. Tuttavia, poiché la scarica e la carica della batteria implicano complessi processi chimici e fisici, non è semplice stimare accuratamente il SOC in diverse condizioni operative.

L'approccio generale per la misurazione dello stato di carica (SOC) consiste nel misurare con estrema precisione sia i coulomb che la corrente che fluisce in entrata e in uscita dallo stack di celle in tutte le condizioni operative, nonché le tensioni di ogni singola cella dello stack. Questi dati vengono quindi utilizzati insieme ai dati del pacco celle precedentemente caricati per le celle monitorate, al fine di sviluppare una stima accurata dello stato di carica (SOC). I dati aggiuntivi necessari per tale calcolo includono la temperatura della cella, se la cella si sta caricando o scaricando al momento delle misurazioni, l'età della cella e altri dati rilevanti ottenuti dal produttore. Talvolta è possibile ottenere dal produttore dati di caratterizzazione sulle prestazioni delle sue celle agli ioni di litio in diverse condizioni operative. Una volta determinato lo stato di carica (SOC), spetta al sistema mantenerlo aggiornato durante il funzionamento successivo, essenzialmente contando i coulomb che fluiscono in entrata e in uscita dalle celle. L'accuratezza di questo approccio può essere compromessa dalla scarsa accuratezza dello stato di carica iniziale e da altri fattori, come l'autoscarica delle celle e gli effetti delle perdite.

#### Approcci per la stima dell'SOC

Per quanto riguarda i metodi di stima dell'SOC, vengono utilizzati principalmente tre approcci: il metodo del conteggio di Coulomb, il metodo della tensione e il metodo del filtro di Kalman normale o esteso.

- **Metodo di conteggio di Coulomb**

Il metodo di conteggio di Coulomb, noto anche come conteggio di ampere-ora e integrazione di corrente, è la tecnica più comune per il calcolo del SOC. Questo metodo utilizza le letture di corrente della batteria integrate matematicamente durante il periodo di utilizzo per calcolare i valori SOC forniti da

$$SOC = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{rated}} \int_{t_0}^{t_0+\tau} (I_b - I_{loss}) dt \quad (3.5)$$

dove  $SOC(t_0)$  è lo SOC iniziale,  $C_{rated}$  è la capacità nominale,  $I_b$  è la corrente della batteria e  $I_{loss}$  è la corrente consumata dalle reazioni di perdita. Il metodo di conteggio di Coulomb calcola quindi la capacità residua semplicemente accumulando la carica trasferita dentro o fuori dalla batteria. L'accuratezza di questo metodo si basa principalmente su una misurazione precisa della corrente di batteria e su una stima accurata dello stato di carica iniziale (SOC). Con una capacità pre-nota, che potrebbe essere memorizzata o inizialmente stimata dalle condizioni operative, lo stato di carica (SOC) di una batteria può essere calcolato integrando le correnti di carica e scarica durante i periodi di funzionamento. Tuttavia, la carica rilasciabile è sempre inferiore alla carica immagazzinata nel ciclo di carica e scarica. In altre parole, si verificano perdite durante la carica e la scarica. Queste perdite, insieme all'autoscarica, causano errori di accumulo. Per una stima più precisa dello stato di carica (SOC), è necessario tenere conto di questi fattori. Inoltre, lo stato di carica (SOC) dovrebbe essere ricalibrato regolarmente e la declinazione della capacità rilasciabile dovrebbe essere considerata per una stima più precisa [15].

- **Metodo di tensione**

Lo stato di carica (SOC) di una batteria, ovvero la sua capacità residua, può essere determinato mediante un test di scarica in condizioni controllate. Il metodo della tensione converte la lettura della tensione della batteria nel valore SOC equivalente utilizzando la curva di scarica nota (tensione vs. SOC) della batteria. Tuttavia, la tensione è influenzata in modo più significativo dalla corrente della batteria a causa della cinetica elettrochimica e della temperatura della batteria. È possibile rendere questo metodo più accurato compensando la lettura della tensione con un termine di correzione proporzionale alla corrente della batteria e utilizzando una tabella di ricerca della tensione di circuito aperto (OCV) della batteria in funzione della temperatura. La necessità di un intervallo di tensione stabile per le batterie rende il metodo della tensione difficile da implementare. Inoltre, il test di scarica di solito include una ricarica consecutiva, il che lo rende troppo dispendioso in termini di tempo per essere preso in considerazione nella maggior parte delle applicazioni. Un altro svantaggio è che

durante il test il funzionamento del sistema viene interrotto (metodo offline), a differenza del conteggio di Coulomb (metodo online) [15].

- **Metodo del filtro di Kalman**

Il filtro di Kalman è un algoritmo per stimare gli stati interni di qualsiasi sistema dinamico; può essere utilizzato anche per stimare lo SOC di una batteria. I filtri di Kalman furono introdotti nel 1960 per fornire una soluzione ricorsiva al filtraggio lineare ottimale sia per l'osservazione dello stato che per i problemi di previsione. Rispetto ad altri approcci di stima, il filtro di Kalman fornisce automaticamente limiti di errore dinamici sulle proprie stime di stato. Modellando il sistema di batterie per includere le incognite desiderate (come lo SOC) nella sua descrizione di stato, il filtro di Kalman ne stima i valori e fornisce limiti di errore sulle stime. Diventa quindi una tecnica di stima dello stato basata su modelli che impiega un meccanismo di correzione degli errori per fornire previsioni in tempo reale dello SOC. Può essere esteso per aumentare la capacità di stima dello SOH in tempo reale utilizzando il filtro di Kalman esteso. In particolare, il filtro di Kalman esteso viene applicato quando il sistema di batterie è non lineare ed è necessario un passaggio di linearizzazione. Sebbene il filtraggio di Kalman sia un metodo online e dinamico, richiede un modello adatto alla batteria e un'identificazione precisa dei suoi parametri. Richiede inoltre un'elevata capacità di calcolo e un'inizializzazione accurata. Altri metodi per la stima dello stato di carica (SOC) sono presentati in letteratura, come la spettroscopia di impedenza, che si basa su misurazioni dell'impedenza di cella, utilizzando un analizzatore di impedenza in tempo reale sia per la carica che per la scarica. Sebbene questa tecnica possa essere utilizzata per la stima dello stato di carica (SOC) e dello stato di salute (SOH) delle celle agli ioni di litio, è stata omessa poiché si basa su misurazioni esterne che utilizzano strumentazione. I metodi basati sulle proprietà fisiche degli elettroliti e sulle reti neurali artificiali non sono applicabili alle batterie agli ioni di litio [15].

Per selezionare il metodo più adatto è fondamentale che la scelta ricada su una tecnica di valutazione online e in tempo reale con bassa complessità computazionale ed elevata accuratezza (basso errore di stima). È inoltre necessario che il metodo di stima utilizzi i valori di tensione e corrente misurati e altri dati raccolti da sensori di temperatura e/o forniti da applicazioni software per PC [15].

Per superare le carenze del metodo di conteggio di Coulomb e migliorarne l'accuratezza di stima, è stato introdotto un algoritmo di conteggio di Coulomb migliorato per la stima dei parametri SOC e SOH delle batterie agli ioni di litio. Il SOC iniziale è ricavato dalle tensioni di carico (carica e scarica) o dalle tensioni a circuito aperto. Le perdite vengono compensate considerando l'efficienza di carica e scarica.

Con la ricalibrazione dinamica sulla capacità massima rilasciabile di una batteria in funzione, viene valutato contemporaneamente anche lo SOH della batteria. Questo a sua volta porta a una stima più precisa del SOC [15].

- **Principio tecnico**

La capacità rilasciabile ( $C_{rilasciabile}$ ) di una batteria in funzione è la capacità rilasciata quando è completamente scarica. Di conseguenza, lo stato di carica (SOC) è definito come la percentuale della capacità rilasciabile rispetto alla capacità nominale della batteria ( $C_{nominale}$ ), indicata dal produttore.

$$SOC = \frac{C_{rilasciabile}}{C_{nominale}} 100\% \quad (3.6)$$

Una batteria completamente carica ha la massima capacità rilasciabile ( $C_{max}$ ), che può essere diversa dalla capacità nominale. In generale, la  $C_{max}$  è in una certa misura diversa dalla  $C_{nominale}$  di una batteria appena utilizzata e diminuisce con il tempo di utilizzo. Può essere utilizzata per valutare lo stato di salute (SOH) di una batteria.

$$SOH = \frac{C_{max}}{C_{nominale}} 100\% \quad (3.7)$$

Quando una batteria si sta scaricando, la profondità di scarica (DOD) può essere espressa come la percentuale della capacità che è stata scaricata rispetto alla capacità nominale,

$$DOD = \frac{C_{rilasciata}}{C_{nominale}} 100\% \quad (3.8)$$

dove  $C_{rilasciata}$  è la capacità scaricata da qualsiasi quantità di corrente. Con una corrente di carica e scarica misurata ( $I_b$ ), la differenza del DOD in un periodo operativo ( $\tau$ ) può essere calcolata da

$$\Delta DOD = \frac{\int_{t_0}^{t_0+\tau} I_b(t) dt}{C_{nominale}} 100\% \quad (3.9)$$

dove  $I_b$  è positivo per la carica e negativo per la scarica. Con il passare del tempo, il DOD si accumula.

$$DOD(t) = DOD(t_0) + \Delta DOD \quad (3.10)$$

Per migliorare l'accuratezza della stima, viene considerata l'efficienza operativa indicata come  $\eta$  e l'espressione DOD diventa,

$$DOD(t) = DOD(t_0) + \eta \Delta DOD \quad (3.11)$$

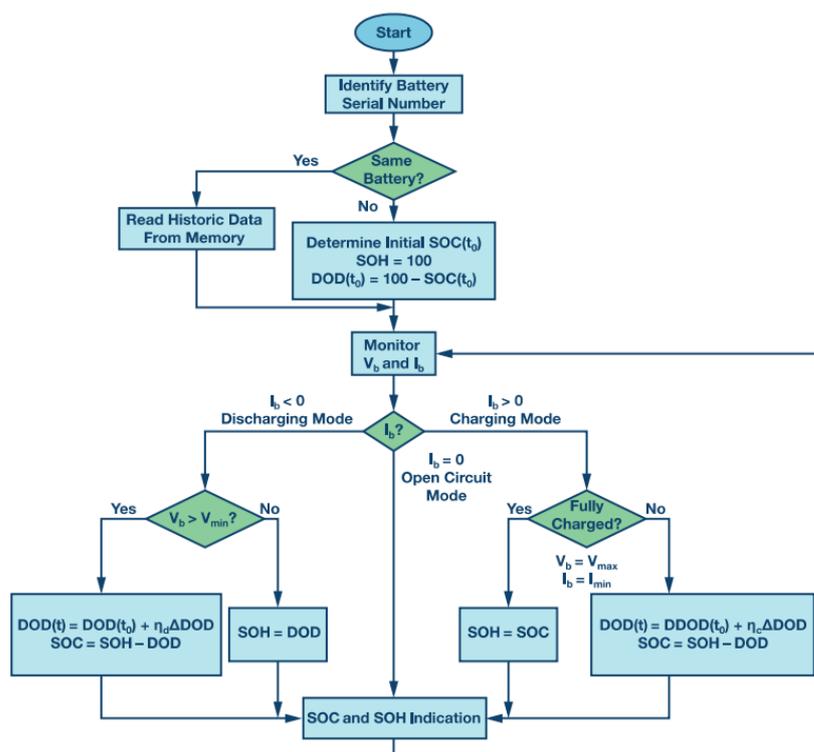
con  $\eta$  uguale a  $\eta_c$  durante la fase di carica e uguale a  $\eta_d$  durante la fase di scarica. Senza considerare l'efficienza operativa e l'invecchiamento della batteria, il SOC può essere espresso come

$$SOC(t) = 100\% - DOD(t) \quad (3.12)$$

Considerando l'SOH, lo SOC è stimato come

$$SOC(t) = SOH(t) - DOD(t) \quad (3.13)$$

La Figura 3.9 mostra il diagramma di flusso dell'algoritmo di conteggio Coulomb avanzato. All'avvio, i dati storici della batteria usata vengono recuperati dalla memoria associata. In assenza di informazioni relative a una batteria appena usata, si presume che lo stato di salute (SOH) sia in buone condizioni e abbia un valore del 100%, e lo stato di carica (SOC) viene inizialmente stimato testando la tensione di circuito aperto o la tensione sotto carico, a seconda delle condizioni iniziali [15].



**Figura 3.9:** Diagramma di flusso dell'algoritmo di conteggio di Coulomb migliorato [15]

Il processo di stima si basa sul monitoraggio della tensione della batteria ( $V_b$ ) e  $I_b$ . La modalità di funzionamento della batteria può essere determinata dalla quantità e dalla direzione della corrente di esercizio. Il DOD somma la carica scaricata in modalità di scarica e la conta al contrario con la carica accumulata nella batteria per la modalità di carica. Dopo una correzione con l'efficienza di carica e scarica, è possibile ottenere una stima più accurata. Lo SOC può quindi essere stimato sottraendo la quantità DOD da quella SOH. Quando la batteria è a circuito aperto con corrente zero, lo SOC si ottiene direttamente dalla relazione tra OCV e SOC.

Si noti che lo stato di carica (SOH) può essere rivalutato quando la batteria è scarica o completamente carica, e la corrente e la tensione di funzionamento della batteria sono specificate dai produttori. La batteria è scarica quando la tensione di carica ( $V_b$ ) scende al di sotto del limite inferiore ( $V_{min}$ ) durante la scarica. In questo caso, la batteria non può più essere utilizzata e deve essere ricaricata. Allo stesso tempo, è possibile effettuare una ricalibrazione dello stato

di salute (SOH) rivalutando il valore dello stato di salute (SOH) tramite il DOD cumulativo nella condizione di stato scarico. D'altra parte, la batteria usata è completamente carica se ( $V_b$ ) raggiunge il limite superiore ( $V_{max}$ ) e ( $I_b$ ) scende al limite inferiore ( $I_{min}$ ) durante la carica. Un nuovo stato di salute (SOH) si ottiene sommando la carica totale immessa nella batteria ed è quindi uguale allo stato di carica (SOC). In pratica, gli stati di carica completa e di scarica completa si verificano occasionalmente. L'accuratezza della valutazione dello stato di salute (SOH) può essere migliorata quando la batteria viene caricata e scaricata completamente frequentemente.

Grazie alla semplicità di calcolo e ai requisiti hardware ridotti, l'algoritmo di conteggio di Coulomb migliorato può essere facilmente implementato in tutti i dispositivi portatili e nei veicoli elettrici. Inoltre, l'errore di stima può essere ridotto all'1% nel ciclo operativo successivo alla rivalutazione del SOH [15].

- **Determinazione iniziale del SOC**

Una batteria può essere utilizzata in tre modalità: carica, scarica e circuito aperto. Nella fase di carica, le variazioni di tensione e corrente della batteria quando la batteria viene caricata in modalità corrente costante, tensione costante (CC-CV) sono solitamente specificate dal produttore. Con una corrente di carica costante, la tensione della batteria aumenta gradualmente e raggiunge la soglia. Una volta che la batteria è stata caricata in modalità tensione costante, la corrente di carica diminuisce prima rapidamente, poi lentamente. Infine, la corrente scende quasi a zero quando la batteria è completamente carica. Questa curva di carica può essere convertita nella relazione tra SOC e tensione di carica durante la fase a corrente costante, e nella relazione tra SOC e corrente di carica durante la fase a tensione costante. Da queste relazioni è possibile dedurre lo SOC iniziale durante la carica [15].

Durante la fase di scarica, la tensione tipica si presenta quando la batteria viene scaricata a diverse correnti, come indicato dal produttore. La tensione ai terminali diminuisce con il passare del tempo di funzionamento. Una corrente più elevata provoca una diminuzione più rapida della tensione ai terminali, con conseguente riduzione del tempo di funzionamento. È quindi possibile ricavare la relazione tra lo stato di carica (SOC) e la tensione di scarica a diverse correnti, e dedurre lo stato di carica (SOC) iniziale durante la fase di scarica.

Nella fase di circuito aperto, è necessario stabilire la relazione tra OCV e SOC. La batteria viene scaricata con diverse correnti prima di scollegarsi dal carico. L'OCV può essere utilizzato per stimare lo SOC se è disponibile un tempo di riposo prolungato.

- **Efficienza di carica e scarica**

L'efficienza operativa di una batteria può essere valutata tramite l'efficienza coulombiana, definita come il rapporto tra il numero di cariche che possono essere estratte dalla batteria durante la scarica e il numero di cariche che entrano nella batteria durante la carica. Si noti che i coefficienti di efficienza di carica e scarica sono ottenuti dai valori medi di diverse batterie testate.

$$\eta_c = \frac{C_{scarica,tassomin}}{C_{carica,tassomax}} \quad (3.14)$$

L'efficienza di scarica è il rapporto tra la capacità rilasciata da due stadi e la  $C_{max}$  in un ciclo di scarica. Tutte le batterie testate vengono caricate completamente e poi scaricate seguendo il profilo di corrente a due stadi, prima con una corrente specificata fino a un DOD designato e poi con una corrente minima fino alla tensione di cut-off. L'efficienza di scarica è calcolata come segue:

$$\eta_d = \frac{I_1 T_1 + I_2 T_2}{C_{max}} \quad (3.15)$$

dove  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $T_1$  e  $T_2$  sono le correnti di scarica e i periodi rispettivamente durante la prima e la seconda fase [15].

- **Algoritmo SOC universale e formulazione matematica**

L'algoritmo universale SOC è proposto e si applica a tutti i tipi di batterie, in particolare alle batterie agli ioni di litio. Utilizzando l'analisi di sistema lineare nel dominio della frequenza, ma senza un modello circuitale, l'OCV viene calcolato in base alla tensione di terminale campionata e alla corrente di scarica della batteria. La conoscenza dell'OCV porta al SOC grazie alla nota mappatura tra OCV e SOC, alle ipotesi considerate che lo SOC sia costante entro una finestra temporale di una certa ampiezza e al fatto che la batteria sia un sistema lineare o debolmente non lineare [15].

In ogni finestra temporale, la tensione terminale  $v(t)$  di una batteria può essere scomposta come

$$\begin{aligned} v(t) &= v_{zi}(t) + v_{zs}(t) \\ v(t) &= v_{zi}(t) + h(t) \times i(t) \end{aligned} \quad (3.16)$$

dove  $v_{zi}(t)$  è la risposta in ingresso zero corrispondente alla tensione al terminale in assenza di corrente di scarica, e  $v_{zs}(t)$  è la risposta in stato zero corrispondente alla tensione al terminale con corrente di scarica,  $i(t)$  come ingresso e sorgente di tensione in cortocircuito.  $h(t)$  è la risposta impulsiva del sistema lineare che modella la batteria. Si noti che la validità della convoluzione nell'Equazione 3.16 si basa sul presupposto di linearità.

Si presume che lo SOC venga estratto nella finestra temporale  $0 \leq t \leq t_w$  e che a  $t < 0$  la corrente di scarica sia sempre zero. Ciò presuppone che prima di  $t = 0$  la batteria sia scollegata dal carico. Questa ipotesi viene successivamente rimossa con lo spostamento della finestra. Con questa ipotesi e ignorando l'effetto di autoscarica, la risposta in ingresso zero è in realtà la corrente di scarica a vuoto (OCV); ovvero,

$$v_{zi}(t) = OCV \cdot u(t) \quad 0 \leq t \leq t_w \quad (3.17)$$

dove  $u(t)$  è una funzione a gradino unitario

$$\begin{aligned} u(t) &= 1 \quad \text{if } t \geq 0 \\ u(t) &= 0 \quad \text{if } t < 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Innanzitutto, si dovrebbe trovare  $f(t)$  che soddisfa la seguente relazione

$$f(t) \times i(t) = \delta(t) \quad 0 \leq t \leq t_w \quad (3.19)$$

Si noti che la condizione deve essere soddisfatta solo nella finestra.

L'algoritmo discreto temporale per risolvere  $f(t)$  è illustrato nella Figura 3.10, dove  $n$  è il numero totale di punti di campionamento nella finestra e  $t_1, t_2, \dots, t_n$  sono i punti temporali di campionamento. L'idea chiave è quella di invertire la convoluzione dei campioni. Il processo è simile a quello di risolvere l'inversa di una matrice utilizzando una trasformazione elementare [15].

Con,  $f(t)$ ,  $v_f(t) = f(t) \times v(t)$  può essere calcolato come

$$\begin{aligned} v_f(t) &= f(t) \times v(t) \\ v_f(t) &= f(t) \times [OCV \cdot u(t) + v_{zs}(t)] \\ v_f(t) &= OCV \cdot u_f(t) + f(t) \times v_{zs}(t) \\ v_f(t) &= OCV \cdot u_f(t) + f(t) \times i(t) \times h(t) \\ v_f(t) &= OCV \cdot u_f(t) + \delta(t) \times h(t) \\ v_f(t) &= OCV \cdot u_f(t) + h(t) \quad 0 \leq t \leq t_w \end{aligned}$$

dove  $u_f(t) = f(t) \times u(t)$ .

```

1: INPUT: Sampled  $i(t_1)$ ,  $0 \leq t_1 < \dots < t_n \leq t_w$ 
2: OUTPUT:  $f(t_1)$ ,  $0 \leq t_1 < \dots < t_n \leq t_w$ 
3: for  $j = 1$  to  $n$  do
4:    $f_{norm}(t_j) = f(t_j) = \delta(t_j)/i(t_1)$ 
5:    $i_{norm}(t_j) = i_f(t_j) = i(t_j)/i(t_1)$ 
6: end for
7: for  $i = 2$  to  $n$  do
8:   for  $j = n$  to  $i$  do
9:      $f(t_j) = f(t_j) - f_{norm}(t_j - 1 + 1)i_f(t_1)$ 
10:     $i_f(t_j) = i_f(t_j) - i_{norm}(t_j - 1 + 1)i_f(t_1)$ 
11:   end for
12: end for

```

**Figura 3.10:** Algoritmo per calcolare  $f(t)$  [15]

La risposta nel dominio della frequenza della batteria può essere considerata finita, e secondo il teorema del valore finale

$$\lim_{f \rightarrow \infty} h(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sH(s) = 0 \quad (3.20)$$

Di conseguenza

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{v_f(t)}{u_f(t)} = OCV \quad (3.21)$$

Ciò significa che quando si utilizza un  $t$  elevato,  $h(t)$  si avvicina a zero e  $v_f(t)/u_f(t)$  fornisce una buona approssimazione dell'OCV nell'attuale finestra temporale.

Dopo l'estrazione dell'OCV, è possibile ottenere la risposta impulsiva del sistema nella finestra temporale corrente

$$h(t) = v_f(t) - OCV \cdot u_f(t) \quad (3.22)$$

Dopo aver completato l'estrazione dell'OCV nella finestra corrente, lo stesso processo per estrarre l'OCV può essere ripetuto nella finestra successiva. Il collo di bottiglia dell'algoritmo risiede principalmente nel passaggio di risoluzione di  $f(t) \times i(t) = \delta(t)$  per  $f(t)$  e nel passaggio successivo di calcolo di  $v_f(t) = f(t) \times v(t)$  e  $u_f(t) = f(t) \times u(t)$ . In realtà, questi due passaggi possono essere combinati in uno e non è necessario calcolare esplicitamente  $f(t)$ . L'algoritmo complessivo è

illustrato nella Figura 3.11 dove  $n$  è il numero totale di punti di campionamento presenti in una finestra.

```

1: INPUT: Sampled  $i(t_1), v(t_1), 0 \leq t_1 < \dots < t_n \leq t_w$ 
2: OUTPUT:  $vf(t_1), uf(t_1), 0 \leq t_1 < \dots < t_n \leq t_w$ 
3: for  $j = 1$  to  $n$  do
4:    $v_{norm}(t_j) = vf(t_j) = v(t_j)/i(t_1)$ 
5:    $u_{norm}(t_j) = uf(t_j) = u(t_j)/i(t_1)$ 
6:    $i_{norm}(t_j) = i_f(t_j) = i(t_j)/i(t_1)$ 
7: end for
8: for  $i = 2$  to  $n$  do
9:   for  $j = n$  to  $i$  do
10:     $v_f(t_j) = v_f(t_j) - v_{norm}(t_j - 1 + 1)i_f(t_1)$ 
11:     $u_f(t_j) = u_f(t_j) - u_{norm}(t_j - 1 + 1)i_f(t_1)$ 
12:     $i_f(t_j) = i_f(t_j) - i_{norm}(t_j - 1 + 1)i_f(t_1)$ 
13:   end for
14: end for

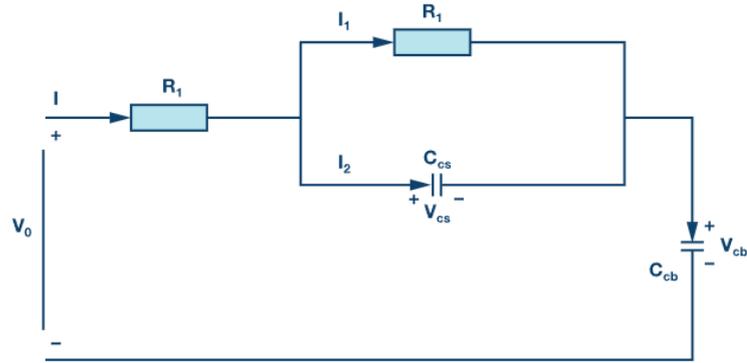
```

**Figura 3.11:** Algoritmo per combinare i passaggi di deconvoluzione e convoluzione [15]

Una volta estratto l'OCV, è possibile dedurre lo SOC utilizzando le variazioni di SOC in funzione dell'OCV. La complessità temporale dell'algoritmo è  $O(n^2)$ , dove  $n$  è il numero di campioni. Gli esperimenti dimostrano che il SOC può essere estratto online con un errore inferiore al 4% per diversi tipi di batteria e correnti di scarica [15].

- **Algoritmo del filtro di Kalman esteso e applicazione**

Il filtro di Kalman esteso viene applicato per stimare direttamente il SOC di un pacco batteria al litio. Si presume che la relazione tra OCV e SOC della batteria sia approssimativamente lineare e vari con la temperatura ambiente. Questa ipotesi corrisponde al comportamento reale della batteria. Una batteria è modellata come un sistema non lineare con lo SOC definito come stato del sistema, pertanto è possibile applicare il filtro di Kalman esteso. Un modello di circuito equivalente per un pacco batteria al litio è mostrato in Figura 3.12. La capacità di massa ( $C_{cb}$ ) rappresenta la capacità di accumulo del pacco batteria e la capacità di superficie ( $C_{cs}$ ) rappresenta gli effetti di diffusione della batteria. Le resistenze ( $R_i$ ) e ( $R_t$ ) rappresentano rispettivamente la resistenza interna e la resistenza di polarizzazione. Le tensioni ai capi del condensatore di massa e del condensatore di superficie sono indicate rispettivamente da ( $V_{cb}$ ) e ( $V_{cs}$ ). La tensione e la corrente ai terminali del pacco batteria sono indicate rispettivamente da ( $V_0$ ) e  $I$  [15].



**Figura 3.12:** Circuito equivalente di tipo Thevenin (in dettaglio a Modello elettrico Thevenin) [15]

I parametri richiesti per il modello di batteria possono essere determinati da dati sperimentali, in cui i test OCV vengono eseguiti durante la scarica successiva della batteria mediante l'iniezione di impulsi di corrente.

Le caratteristiche del modello sono governate dalle seguenti equazioni

$$\begin{aligned}\dot{V}_{cb} &= \frac{I}{C_{cb}} \\ \dot{V}_{cs} &= \frac{I}{R_t C_{cs}} + \frac{1}{C_{cb}} I \\ V_0 &= V_{cb} + V_{cs} + IR_i\end{aligned}\quad (3.23)$$

Poiché la relazione tra OCV e SOC della batteria è solo lineare a tratti nella pratica,  $V_{cb}$  può essere espresso come

$$V_{cb} = kS_{oc} + d \quad (3.24)$$

dove i coefficienti  $k$  e  $d$  non sono costanti e variano con lo stato di carica della batteria e la temperatura ambiente. Quindi

$$\begin{aligned}\dot{S}_{oc} &= \frac{I}{kC_{cb}} \\ \dot{V}_{cs} &= -\frac{I}{R_t C_{cs}} V_{cs} + \frac{1}{C_{cb}} I \\ V_0 &= kS_{oc} + V_{cs} + IR_i + d\end{aligned}\quad (3.25)$$

Quindi le equazioni del sistema finale possono essere riscritte come

$$\begin{bmatrix} \dot{S}_{oc} \\ \dot{V}_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I}{kC_{cb}} \\ -\frac{1}{R_t C_{cs}} V_{cs} + \frac{1}{C_{cb}} I \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$V_0 = kS_{oc} + V_{cs} + IR_i + d \quad (3.27)$$

Il sistema di batterie modellato dalle equazioni precedenti è non lineare e viene applicata la tecnica del filtro di Kalman esteso.

Il filtro di Kalman esteso è l'estensione del filtro di Kalman per sistemi non lineari. Con la tecnica del filtro di Kalman esteso, viene eseguito un processo di linearizzazione a ogni passo temporale per approssimare il sistema non lineare con un sistema lineare tempo-variante. Il sistema lineare tempo-variante viene quindi utilizzato in un filtro di Kalman, ottenendo un filtro di Kalman esteso per il sistema non lineare reale. Come un filtro di Kalman, anche il filtro di Kalman esteso utilizza i dati di ingresso e uscita misurati per trovare la stima dell'errore quadratico medio minimo dello stato reale, con l'ipotesi che il rumore di processo e il rumore del sensore siano rumori gaussiani indipendenti a media nulla. Nelle equazioni 3.26 e 3.27 del sistema del pacco batteria, le variabili di stato del sistema sono definite come  $x_1(t) = S_{oc}$  e  $x_2(t) = V_{cs}$

L'ingresso è definito come  $u(t) = I$  e l'uscita è  $y(t) = V_0$ . Le equazioni 3.26 e 3.27 del sistema di batterie possono essere riscritte come

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) + w \\ y &= g(x, u) + v \end{aligned}$$

dove  $x = [x_1, x_2]^T$

I termini  $w$  e  $v$  non rappresentano solo disturbi casuali, ma anche errori causati dalle variazioni dei parametri  $d$  e  $k$ . Si suppone che i termini  $w$  e  $v$  siano processi di rumore gaussiano indipendenti, a media nulla, con matrici di covarianza  $R$  e  $Q$ , rispettivamente.

Le funzioni  $f(x,u)$  e  $g(x,u)$  sono

$$\begin{aligned} f(x, u) &= \begin{bmatrix} \frac{u}{kC_{cb}} \\ -\frac{1}{R_t C_{cs}} x_2 + \frac{1}{C_{cb}} u \end{bmatrix} \\ g(x, u) &= kx_1 + x_2 + R_i u + d \end{aligned}$$

Se le funzioni  $f(x,u)$  e  $g(x,u)$  sono linearizzate da uno sviluppo in serie di Taylor del primo ordine, ad ogni passo del campione rispetto al punto operativo corrente, il modello linearizzato è

$$\delta\dot{x} = A_k\delta x + B_k\delta u \quad (3.28)$$

$$\delta y = C_k\delta x + D_k\delta u \quad (3.29)$$

Dove

$$A_k = \frac{\delta f(x,u)}{\delta x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_t C_{cs}} \end{bmatrix}, \quad B_k = \frac{\delta f(x,u)}{\delta u} = \begin{bmatrix} 1 \\ kC_{cb} \\ \frac{1}{C_{cs}} \end{bmatrix}$$

$$C_k = \frac{\delta g(x,u)}{\delta x} = [k \quad 1], \quad D_k = \frac{\delta f(x,u)}{\delta u} = R_i$$

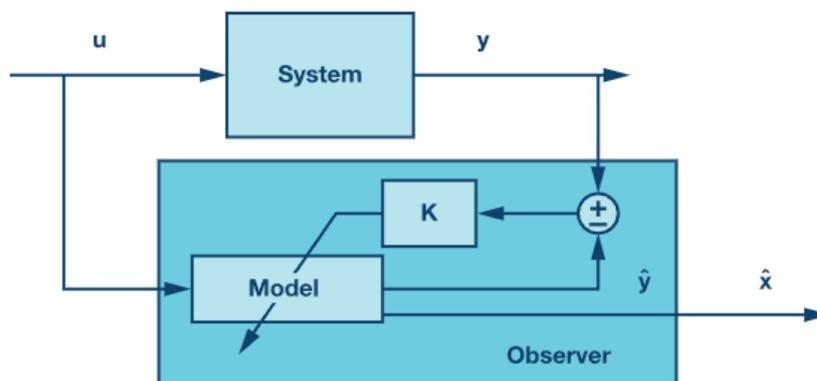
Il modello rappresentato dalle equazioni 3.28 e 3.29 può essere discretizzato come

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k \quad (3.30)$$

$$y_{k+1} = C_k x_k + D_k u_k \quad (3.31)$$

dove  $A_d \approx E + T_c A_k$ ,  $B_d \approx T_c B_k$ ,  $E$  è la matrice unitaria e  $T_c$  è il periodo di campionamento, e  $C_d \approx C_k$ ,  $D_d \approx D_k$ .

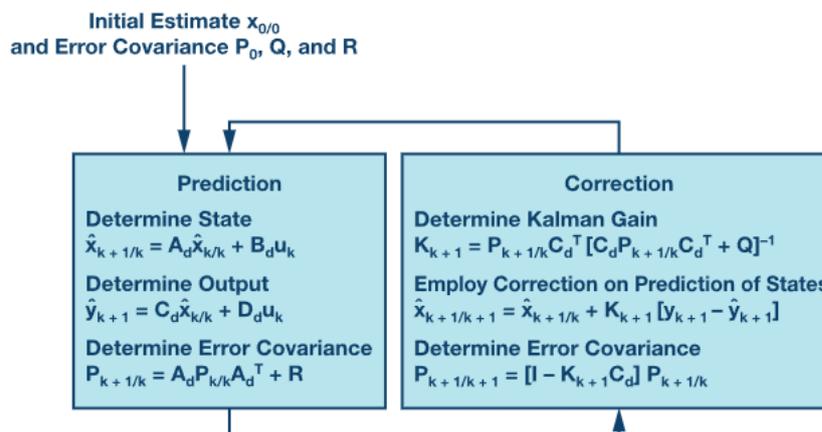
Il filtro di Kalman è un osservatore ottimale il cui principio è illustrato in Figura 3.13. Il principio è quello di minimizzare, in tempo reale, gli errori tra i valori stimati e quelli misurati, utilizzando un feedback che corregge le variabili incerte del modello utilizzato. Grazie a tale adattamento del modello, è possibile osservare i parametri fisici del modello che non sono accessibili tramite misure. La correzione è pesata da un vettore di guadagno  $K$  che consente di correggere la dinamica e le prestazioni del filtro. Il guadagno viene calcolato a ogni iterazione a partire dalle previsioni di errore e dalle incertezze (rumore) sugli stati e sulle misure. Il controllo dinamico del filtro si basa quindi sull'inizializzazione delle



**Figura 3.13:** Principio del filtro di Kalman [15]

matrici di rumore degli stati  $Q$  e delle misure  $R$ , nonché sull'inizializzazione della matrice di covarianza degli errori  $P$  [15].

L'algoritmo del filtro di Kalman, illustrato in Figura 3.14, si svolge in due fasi: la prima riguarda l'inizializzazione delle matrici  $P$ ,  $Q$  e  $R$ , e la seconda riguarda l'osservazione, che si compone di due passaggi per ciascun intervallo di campionamento. In primo luogo, l'algoritmo predice il valore dello stato attuale, dell'output e della covarianza dell'errore. In secondo luogo, utilizzando una misura dell'output del sistema fisico, corregge la stima dello stato e la covarianza dell'errore.



**Figura 3.14:** Algoritmo del filtro di Kalman [15]

Pertanto, il filtro di Kalman esteso viene applicato per ottenere una stima del SOC (stato di carica) di un pacco batteria al litio. La complessità computazionale

di questo algoritmo è  $O(n^3)$ , dove  $n$  è il numero di misurazioni. I risultati sperimentali mostrano che il metodo di stima del SOC basato sul filtro di Kalman esteso proposto è efficace e può stimare accuratamente il SOC della batteria. Può essere applicato anche per stimare il valore SOH del pacco batteria agli ioni di litio [15].

### 3.2.2 Stima dello stato di salute (SOH)

L'SOH rappresenta una valutazione della capacità residua di una cella rispetto alla prestazione valutata in fase di fabbricazione, andando perciò a rappresentare un fattore di invecchiamento e di degradazione della batteria. Di solito, si intende una prestazione in cui una batteria perfettamente sana e senza perdite di capacità è rappresentata al 100%. A causa di parametri come l'invecchiamento, l'utilizzo, le condizioni ambientali e i cicli di ricarica, lo SOH di una batteria finirà per ridursi nel tempo. La valutazione SOH fornisce informazioni sulla vita utile residua della batteria, che può influire su decisioni come la manutenzione, la sostituzione e l'utilizzo ottimale. Pertanto, svolge un ruolo fondamentale per una gestione efficace della batteria. Una corretta comprensione della SOH può portare a una maggiore affidabilità del sistema, alla riduzione dei costi e alla prevenzione di guasti imprevisti della batteria.

Per molte applicazioni, una stima precisa dello stato di salute della batteria (SOH) gioca un ruolo cruciale. Comprendere il valore di carica della batteria nei veicoli elettrici può aiutare a decidere quando sostituire la batteria e a ottimizzare la guida per la sua durata. La conoscenza del valore dello stato di salute della batteria (SOH) può contribuire a pianificare la manutenzione e a migliorare l'affidabilità dell'alimentazione nei sistemi di accumulo di energia. La conoscenza del valore dello stato di salute della batteria (SOH) può aiutare gli utenti a gestire l'utilizzo e le abitudini di ricarica per prolungare la durata della batteria nei dispositivi elettronici portatili. Utenti e gestori di sistema possono prolungare la durata della batteria, migliorarne la sicurezza e, di conseguenza, prendere decisioni sull'utilizzo e la sostituzione misurando con precisione il suo SOH. Pertanto, nel mondo dei sistemi di gestione della batteria (BMS), l'ottimizzazione delle tecniche di stima del SOH può diventare sempre più un obiettivo fondamentale [16].

La valutazione SOH può essere effettuata mediante diverse tecniche, ciascuna con i suoi pro e contro:

- **Confronto della capacità:** il modo più semplice per confrontare la capacità massima attuale della batteria con quella di quando è nuova è eseguire un ciclo completo di carica-scarica e calcolare la capacità di carica totale.

- **Stima basata su modelli:** in questa tecnica, vengono creati modelli matematici o fisici che replicano il comportamento della batteria. Il valore di SOH può essere calcolato adattando questi modelli a dati di misurazione reali.
- **Tecniche di apprendimento automatico:** per la valutazione SOH, le tecnologie di apprendimento automatico stanno prendendo sempre più piede con l'avvento dell'intelligenza artificiale. Procedure come le macchine a vettori di supporto o le reti neurali possono fornire previsioni precise sullo stato di salute della batteria esaminando i dati precedenti.
- **Misurazione dell'impedenza:** con l'invecchiamento della batteria, la sua impedenza interna aumenta. Lo stato di salute della batteria può essere facilmente calcolato misurando l'impedenza e confrontandola con i valori di base.

### 3.3 Bilanciamento delle celle

Come già anticipato nella sezione 3.1 e nella sottosezione 3.1.1, spesso diverse celle batteria vengono collegate in serie per fornire tensione e potenza maggiori al carico in una vasta gamma di applicazioni. Questo comporta delle differenze nella pratica, dovute a tolleranze di produzione, tassi di autoscarica diversi, variazioni di temperatura durante il funzionamento e processi di invecchiamento non uniformi. Queste discrepanze tra le celle si amplificano nel corso del ciclo di vita e potrebbero portare a situazioni di sovraccarico o scarico eccessivo. È evidente che una tale non uniformità limita la capacità della batteria e potrebbe addirittura comportare rischi per la sicurezza. Pertanto, mantenere tutte le celle correttamente bilanciate è di fondamentale importanza per migliorare la durata della batteria. Come descritto in precedenza, il bilanciamento delle celle può essere fatto in due modi differenti:

- Bilanciamento passivo
- Bilanciamento attivo

Questi due modi si suddividono in altre sottocategorie come possiamo notare nella Figura 3.15

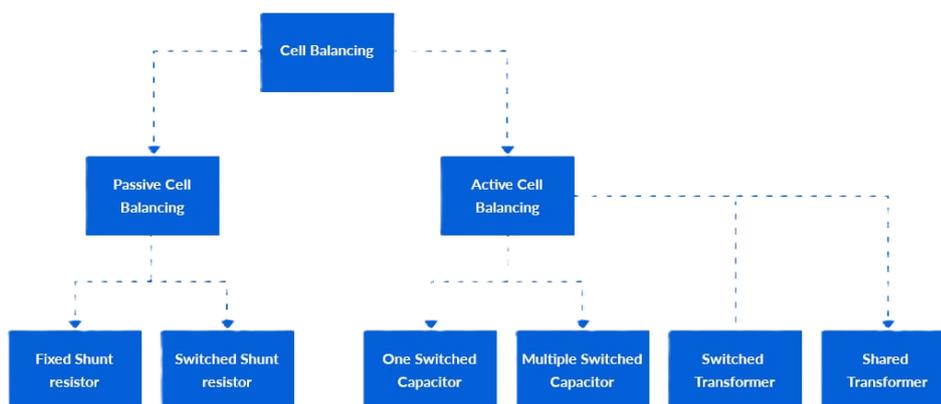


Figura 3.15: Tipi di bilanciamento [17]

### 3.3.1 Bilanciamento passivo

Il bilanciamento passivo è un metodo per bilanciare le celle di un pacco batteria che sfrutta lo svuotamento di carica. In questa tecnica le celle sono connesse a un interruttore e a un resistore di reiezione (detto "shunt"). Il semplice circuito per bilanciare due celle è mostrato in Figura 3.16. Questo circuito può essere scalato anche su un numero maggiore di celle. Avendo un resistore di reiezione per ogni cella nel pacco batteria in modo da dissipare la carica, il bilanciamento passivo è chiamato anche *shunting cell balancing* [18].

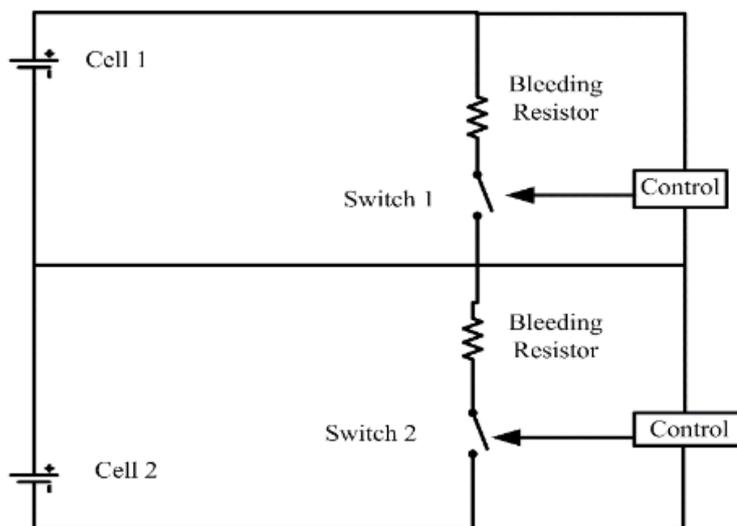


Figura 3.16: Circuito per il bilanciamento passivo [18]

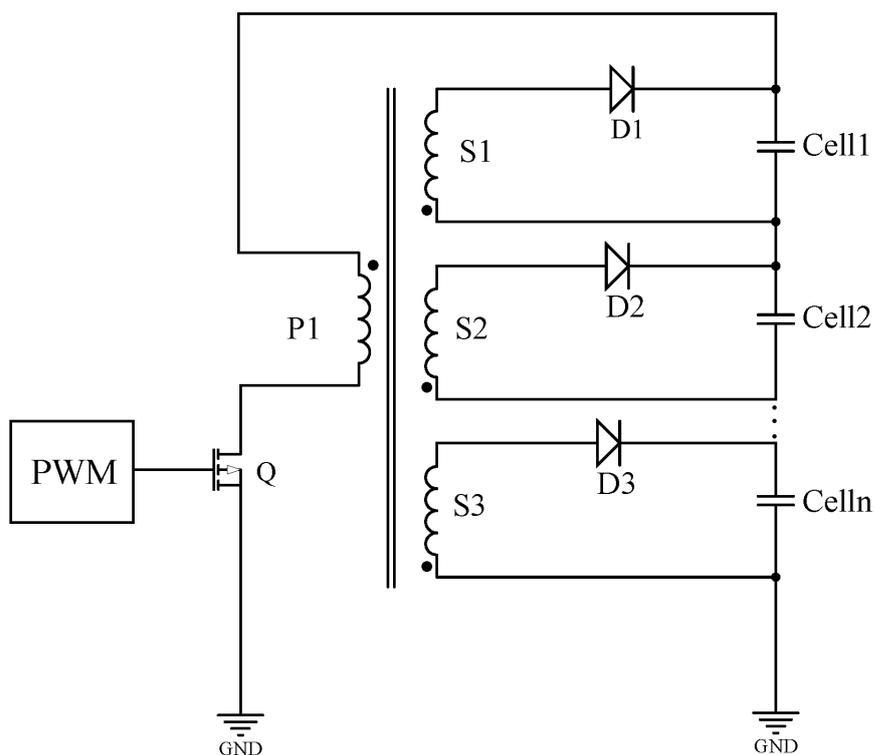
In questo caso l'interruttore 1 è collegato alla cella 1 e l'interruttore 2 è collegato alla cella 2. L'impulso controlla la commutazione confrontando la SOC di una cella con la SOC di altre celle collegate in serie. Se la SOC della cella 1 è maggiore della SOC della cella 2, l'interruttore 1 viene attivato e la cella 1 si scarica fino alla resistenza di reiezione fino a quando la SOC della cella 1 è uguale alla SOC della cella 2. Per prima cosa viene scelta la cella con la carica massima, quindi ogni cella della stringa viene caricata fino a quel livello e infine tutte le celle della stringa vengono caricate insieme fino a quando non sono tutte completamente cariche e per bilanciare la cella nel minor tempo possibile il valore del resistore di reiezione viene tenuto basso [18]. Questa tecnica consente di mantenere tutte le celle allo stesso stato di carica in modo economico, anche in presenza di discrepanze tra le celle nel lungo periodo. Inoltre, una volta che il pacco batteria è bilanciato, non si verificano sprechi energetici superflui. Tuttavia, presenta una gestione termica limitata e una bassa efficienza, a causa delle significative perdite di energia, senza apportare benefici alla durata complessiva della batteria [17].

### **3.3.2 Bilanciamento attivo**

Il bilanciamento attivo risolve il problema dello spreco di carica del bilanciamento passivo. Invece di disperdere la carica attraverso un resistore, qua la carica viene ridistribuita tra le celle più cariche e quelle meno cariche usando un condensatore, un induttore o un trasformatore ad avvolgimento multiplo.

#### **Bilanciamento attivo con convertitore Flyback**

Come nel bilanciamento passivo, la carica viene dispersa attraverso la resistenza di reiezione, quindi l'efficienza di bilanciamento della cella è bassa. Tuttavia, in questo tipo di bilanciamento è usato un trasformatore ad avvolgimento multiplo in modo da ridurre lo spreco di carica. L'avvolgimento primario di un trasformatore a più avvolgimenti è alimentato con la somma completa della tensione di entrambe le celle, e questa tensione è distribuita uniformemente tra entrambe le celle sul lato secondario [18].



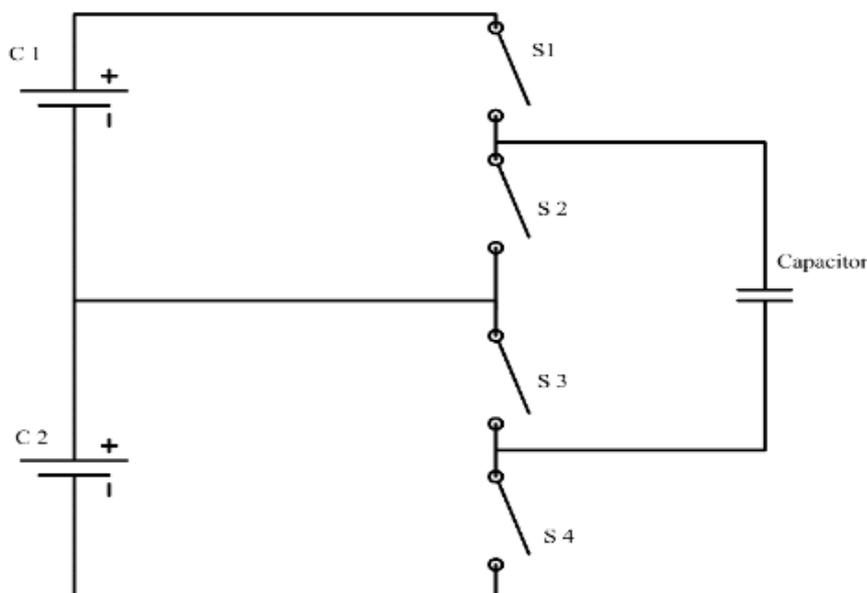
**Figura 3.17:** Bilanciamento con convertitore Flyback [18]

Supponendo di avere due celle connesse al terminale di uscita con una tensione iniziale di 3.6V e 3.8V, rispettivamente. La tensione iniziale su entrambe le celle è di 7,4V. Sul lato di ingresso, questa tensione viene alimentata al trasformatore. Un interruttore MOSFET è collegato al terminale primario del trasformatore ed entrambe le celle sono collegate al terminale di uscita attraverso l'interruttore. L'algoritmo di gestione del bilanciamento confronterà le tensioni di ingresso di entrambe le celle e darà 1 se non sono uguali, altrimenti 0 se sono uguali. Questo valore ottenuto dalla comparazione verrà moltiplicato per il segnale PWM. Questo segnale è l'impulso per il MOSFET collegato al terminale primario del trasformatore. Quando la tensione dell'anodo è maggiore della tensione del catodo al terminale di uscita, il diodo conduce e carica la cella; quando le tensioni di entrambe le celle saranno allo stesso livello, l'algoritmo darà 0 come output, il quale spegnerà il MOSFET e aprirà il circuito al terminale primario del trasformatore [18].

### Bilanciamento attivo con condensatori

Questo metodo richiede  $n-1$  condensatori e  $2n$  interruttori per il bilanciamento, dove  $n$  è il numero di celle che devono essere bilanciate. Questo metodo funziona

sia in condizioni di carica che di scarica.



**Figura 3.18:** Bilanciamento con condensatori [18]

Poiché funziona in due sole modalità, è una tecnica abbastanza semplice per bilanciare la cella, cioè nella prima modalità gli interruttori  $S_1$  e  $S_3$  sono chiusi e quindi il condensatore è collegato alla cella  $C_1$  e il condensatore si carica fino a quando il suo potenziale diventa uguale a quello della cella  $C_1$  dopo di che viene dato un certo tempo di transizione e dopo l'interruttore  $S_2$  e  $S_4$  vengono accesi e ora la cella  $C_2$  è collegata al condensatore. Supponendo che la cella  $C_1$  sia molto carica rispetto alla cella  $C_2$  allora in questo scenario il condensatore caricherà la cella  $C_2$ . Il problema principale di questo bilanciamento è il lungo tempo richiesto per bilanciare le celle. Possiamo scegliere un qualsiasi valore di capacità, ma una capacità alta significa anche una resistenza alta, la quale rallenta il processo di equalizzazione ancora di più. Tuttavia, questo metodo è stato modificato per ridurre il tempo di equalizzazione della cella, ma un altro problema di questo metodo è l'elevato costo dovuto al grande numero di interruttori richiesti [18].

### Bilanciamento attivo con induttori

Invece di utilizzare un condensatore, in questo caso viene impiegato un induttore, per trasferire la carica da una cella all'altra. Il motivo della scelta dell'induttore rispetto al condensatore è legato al numero di interruttori richiesti: per un pacco con  $n$  celle, l'induttore necessita di  $n$  interruttori, mentre un sistema basato su condensatori ne richiede  $2n$ . Questa metodologia si articola in due fasi: nella prima,

l'interruttore  $S_1$  viene chiuso, permettendo alla cella  $C_1$  di caricare l'induttore. Successivamente,  $S_2$  viene aperto e si chiude l'interruttore  $S_1$ , così da permettere all'induttore di trasferire energia alla cella con bassa tensione  $C_2$ , considerando la cella  $C_1$  come la cella con alta tensione. Questa tecnica presenta un tempo di equalizzazione relativamente lungo, considerando ad esempio, un pacco composto da quattro celle in serie  $C_1, C_2, C_3, C_4$ . La cella con il potenziale più basso è  $C_4$  e quella con il potenziale più alto è  $C_1$ . Quindi, per bilanciare tutte le celle, questo metodo trasferisce prima l'eccesso di carica da  $C_1$  a  $C_2$ , poi da  $C_2$  a  $C_3$  e infine da  $C_3$  a  $C_4$ . In pratica, questo metodo non fa altro che confrontare le due celle adiacenti e poi trasferire l'eccesso di carica da una cella a un'altra una alla volta e in questo modo l'induttore impiega molto tempo per bilanciare tutte le celle a parità di tensione. Un circuito convenzionale di bilanciamento basato sugli induttori è mostrato in Figura 3.19 [18].

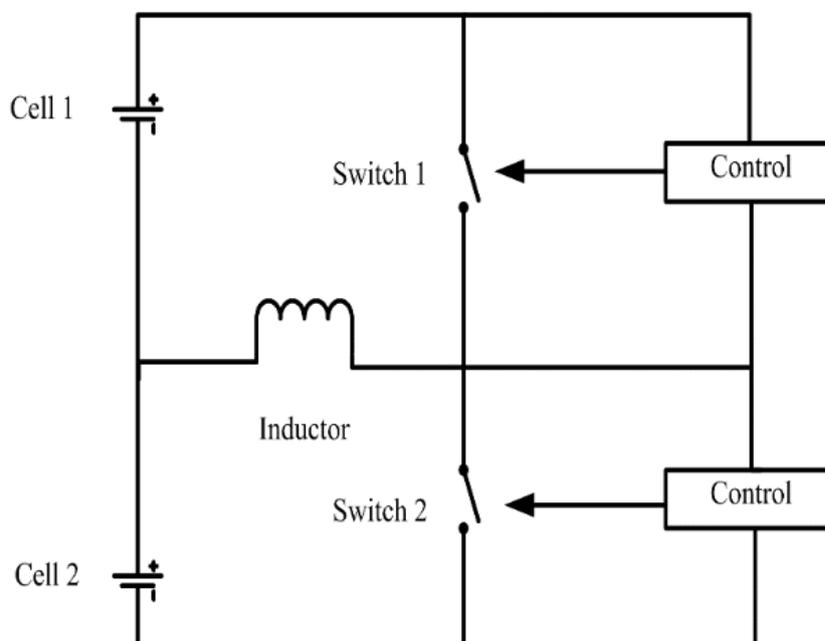
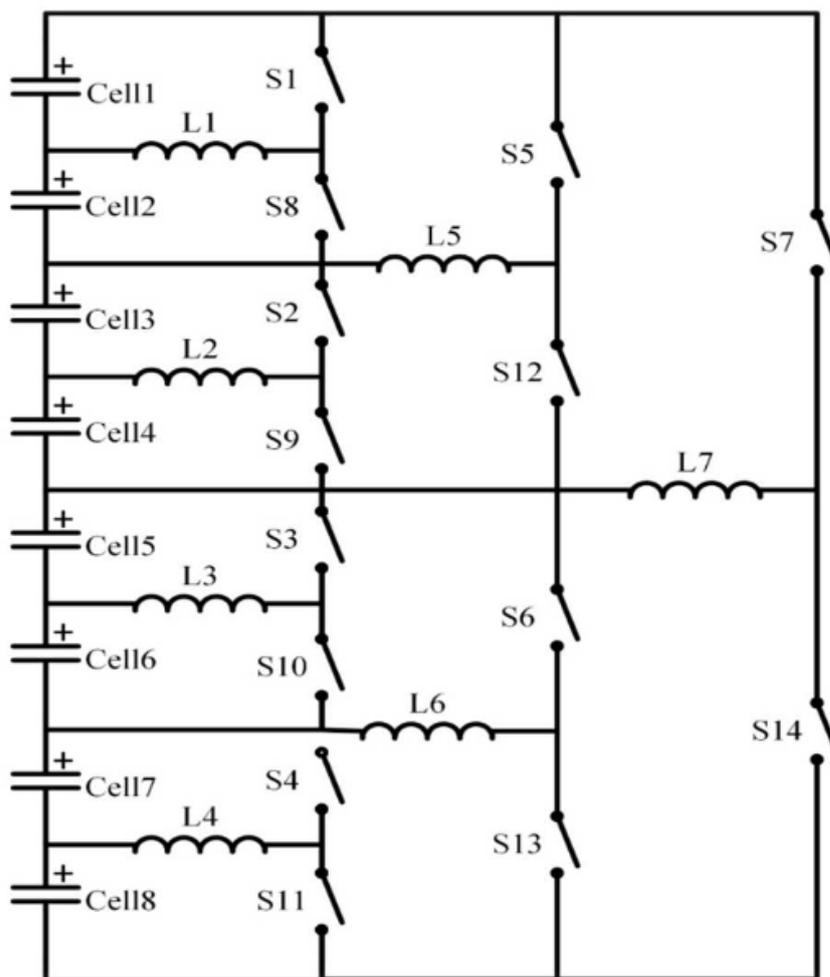


Fig. 9. Circuit diagram of Inductor based balancing

**Figura 3.19:** Circuito di bilanciamento basato sugli induttori [18]

Tuttavia, un'altra tecnica di bilanciamento basata su induttori è ampiamente utilizzata e ha un tempo di equalizzazione più breve rispetto alle altre. In questa tecnica, le celle vengono divise in gruppi e poi bilanciate in base al gruppo, riducendo così il tempo necessario per l'equalizzazione e richiedendo  $N-1$  interruttori per ogni  $N$  celle. In questo bilanciamento basato sugli induttori (Figura 3.20), le celle sono

divise in gruppi come l'induttore  $L_1$  bilancerà la cella1 e la cella2 dopo di che l'induttore  $L_5$  bilancerà il gruppo di celle cella1, cella2 e cella3, cella4 come dopo farà l'induttore  $L_7$  che bilancerà la metà superiore e la metà inferiore del gruppo di celle. Per bilanciare le celle, prima vengono accesi gli interruttori  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7$  in modo da caricare l'induttore e successivamente al ciclo successivo vengono accesi gli interruttori  $S_8, S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}, S_{15}$  per bilanciare le celle adiacenti [18].



**Figura 3.20:** Circuito di bilanciamento basato sugli induttori per 8 celle [18]

## Capitolo 4

# Progettazione dispositivo

Questo capitolo descrive le fasi di progettazione e realizzazione del dispositivo per monitorare una batteria. In particolare, nelle sezioni verranno esaminate:

- **Sviluppo Hardware:** tratta della selezione componenti, progettazione PCB, protocolli di comunicazione e soluzioni meccaniche adottate
- **Sviluppo Firmware:** descrive la progettazione del codice inserito all'interno dell'MCU utilizzata sul dispositivo
- **Sviluppo GUI:** analizza la creazione dell'interfaccia grafica per visualizzare i dati raccolti
- **Algoritmo SOC e SOH:** approfondisce le soluzioni scelte per implementare l'algoritmo di stima dei parametri SOC e SOH

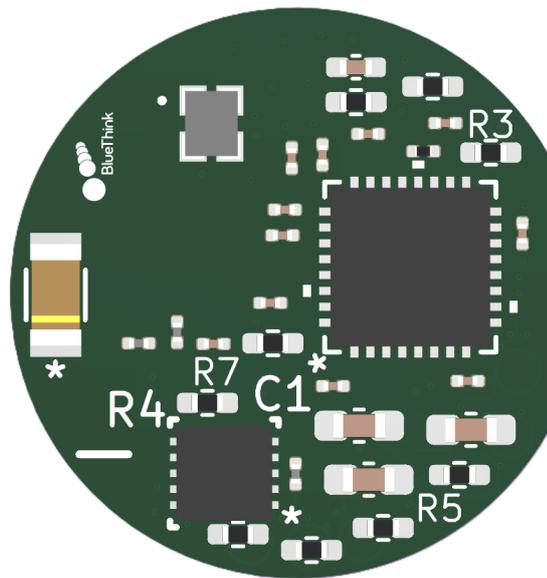
## 4.1 Sviluppo Hardware

L'architettura hardware del dispositivo di monitoraggio è stata progettata in modo da poter avere un monitoraggio continuo e preciso dei parametri elettrici e termici, che vengono trasmessi periodicamente tramite un protocollo di comunicazione wireless. In particolare, il sistema si concentra sull'acquisizione di valori fondamentali come corrente, tensione e temperatura, utilizzati non solo per il monitoraggio in tempo reale, ma anche per stimare parametri critici della cella come lo stato di carica (SOC) e lo stato di salute (SOH). In aggiunta, è stata aggiunta una misura di accelerazione per fornire un quadro ancora più completo e dettagliato della cella. La struttura del dispositivo prevede una configurazione semi-rigida in modo da potersi adattare a diverse forme e dimensioni di cella, andando a fornire versatilità e compatibilità con varie configurazioni. Di seguito vengono mostrate tutte le sezioni della PCB e il suo montaggio sulla cella:

- **Fronte PCB polo negativo:**

Nella scheda è stato montato un microcontrollore (posto sul lato destro in Figura 4.1) Wireless con certificazione Automotive Grado 2 (AEC-Q100). L'MCU integra un ricetrasmittitore a 2.4 GHz compatibile con il protocollo Bluetooth 5.3 Low Energy (BLE). Supporta i principali protocolli di comunicazione seriale, tra cui SPI, I2C e UART, ed è dotato di un convertitore analogico-digitale (ADC) a 12 bit. Il modello selezionato opera a una frequenza di 48 MHz (oscillatore in alto nella Figura 4.1). Per utilizzare il protocollo BLE è stata montata un antenna chip (a sinistra nella Figura 4.1), anche essa con certificazione Automotive, in modo da poter comunicare i dati ad un cloud.

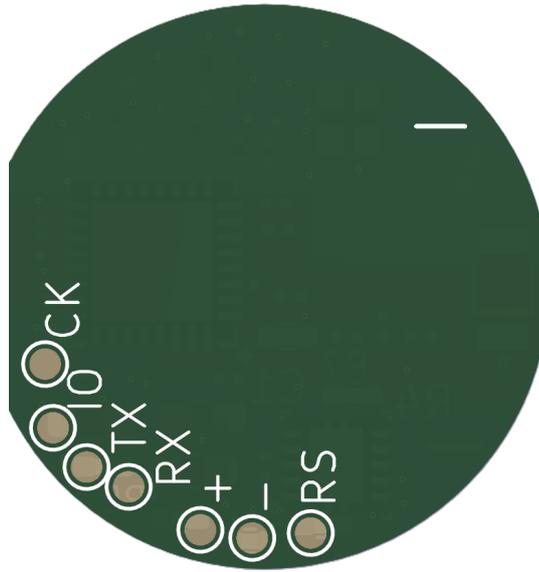
Per l'alimentazione del microcontrollore che è situata nel range 1.71V-3.8V, quindi a bassa tensione, è stato inserito un Buck-Boost (in basso nella Figura 4.1) che tenga stabile la tensione al valore operativo scelto per tutto il dispositivo. Inoltre, è presente il circuito di misura della tensione (cerchiato in blu in Figura 4.1) che è stato implementato tramite un partitore collegato ad uno dei canali ADC del MCU, con l'aggiunta di un condensatore in parallelo alla resistenza inferiore del partitore (formando perciò un filtro passa-basso) in modo da poter filtrare disturbi ad alta frequenza (come quelli dovuti a segnali digitali o rumore elettromagnetico) e stabilizzare le fluttuazioni delle letture dell'ADC.



**Figura 4.1:** Visione frontale PCB polo negativo

- **Posteriore PCB polo negativo:**

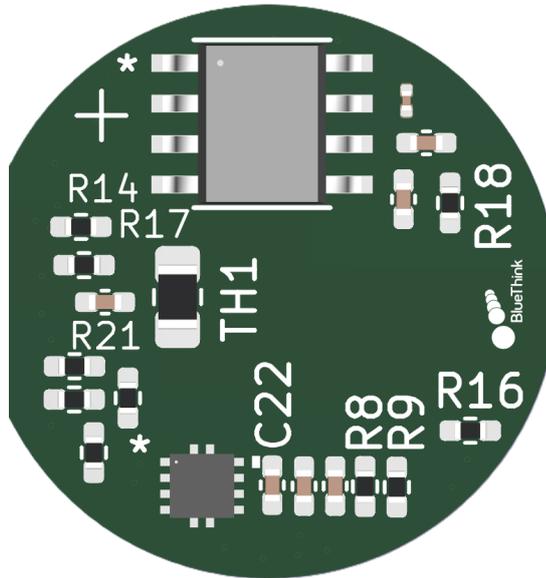
Sul posteriore della PCB posta sul polo negativo sono presenti sette piazzole. Le piccole piazzole sono utili all'interfaccia di debug per poter caricare il codice del firmware nel microcontrollore e per poter testare il corretto funzionamento del codice inserito.



**Figura 4.2:** Visione posteriore PCB polo negativo

- **Fronte PCB polo positivo:**

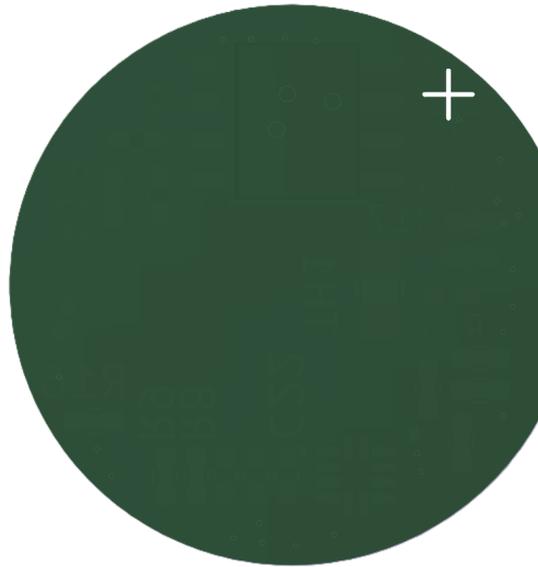
Sul fronte della PCB posta sul polo positivo sono presenti le misure di corrente, accelerazione e temperatura. La misura di corrente è eseguita da un sensore ad effetto Hall (in alto nella Figura 4.3) con una dinamica bidirezionale con range da -30A a +30A, che attraverso la sua uscita in tensione letta dall'ADC a 12 bit del MCU permette di osservare i valori delle correnti generati dalla cella. La misura di accelerazione è catturata dal sensore MEMS (in basso nella Figura 4.3), che permette di osservare range programmabili di accelerazione fino ad un massimo di  $\pm 16g$ . Mentre, la misura di temperatura avviene tramite la lettura della tensione presente su un termistore (del tipo NTC, cioè una resistenza che con l'aumento della temperatura diminuisce il suo valore) posto come resistenza inferiore di un partitore collegato ad uno dei canali ADC del microcontrollore, come mostrato precedentemente nella Figura 3.6.



**Figura 4.3:** Visione frontale PCB polo positivo

- **Posteriore PCB polo positivo:**

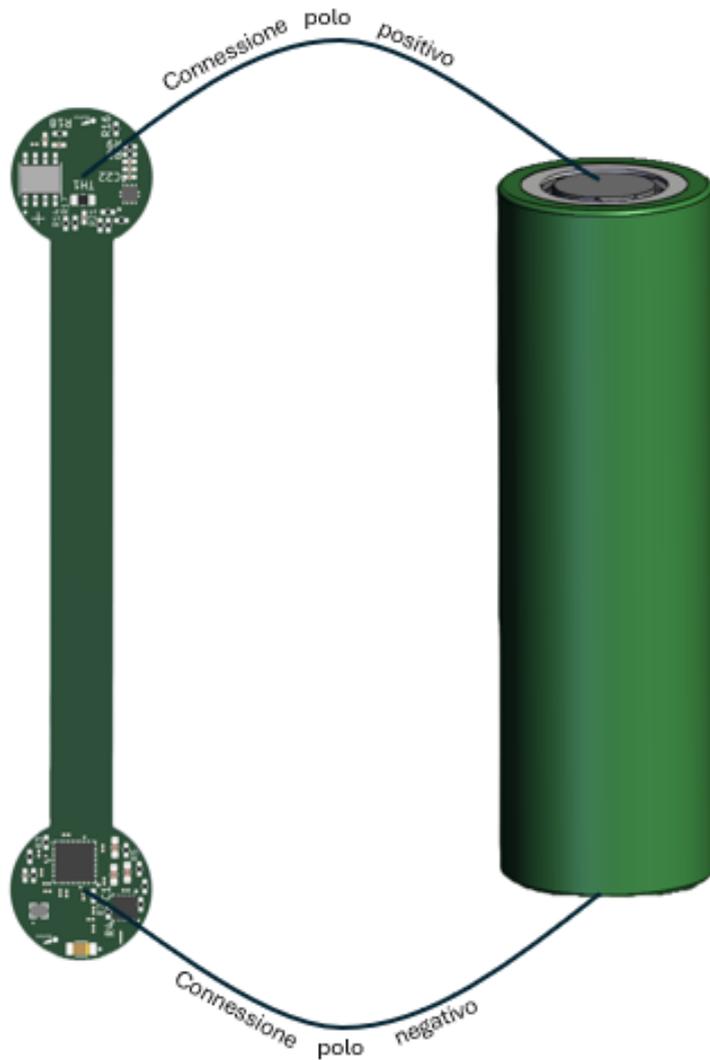
Sul retro della PCB del polo positivo è presente una parte di contatto omessa nella figura seguente.



**Figura 4.4:** Visione posteriore PCB polo positivo

- **Montaggio dispositivo:**

Le Figura 4.5 mostra la connessione del dispositivo agli elettrodi di una cella. PULSE viene montato con una bassa invasività utilizzando dei nastri di nichel. Il dispositivo si adatta ai comuni pacchi batteria senza dover modificare la struttura di assemblaggio.

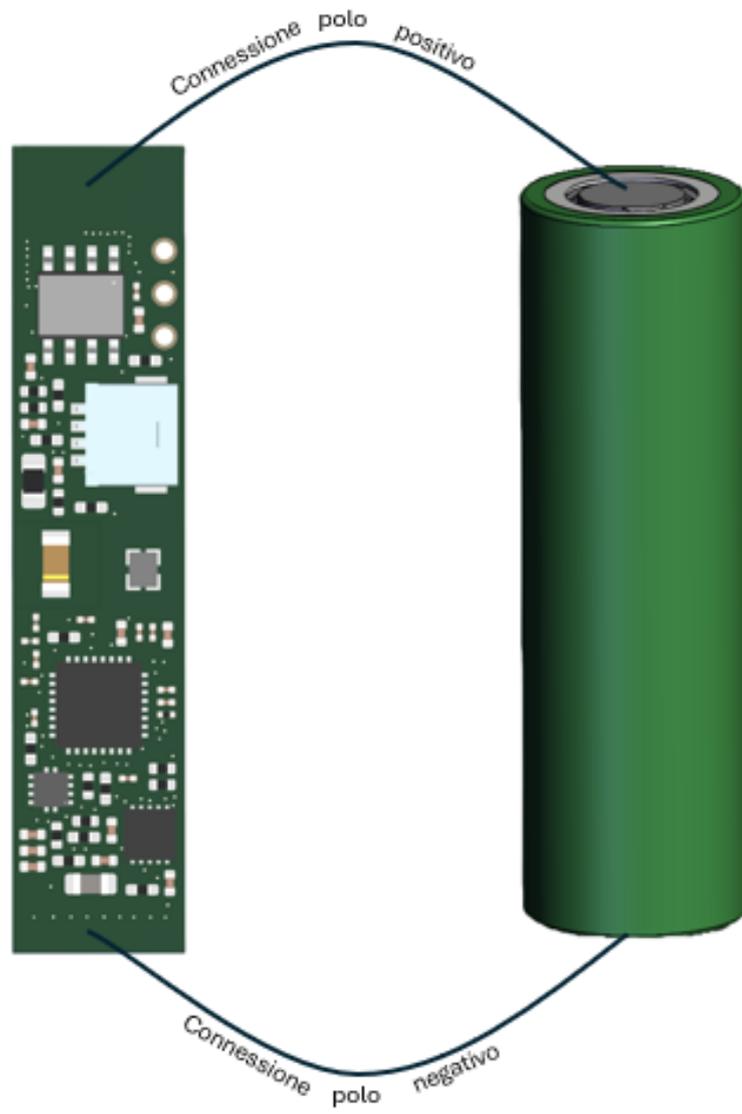


**Figura 4.5:** Connessione di PULSE ad una cella cilindrica 21700

Successivamente è stata introdotta una nuova versione del prototipo per poter migliorare l'adattabilità del dispositivo a diverse forme di cella e per ridurre il costo di produzione in modo da poter competere con le diverse soluzioni sul mercato. Anche questa versione utilizza dei nastri di nichel ma garantendo una maggiore semplicità di assemblaggio con la cella e una migliore versatilità per i formati di batteria utilizzabili.



**Figura 4.6:** Montaggio su cella prismatiche



**Figura 4.7:** Montaggio su cella cilindrica

Nello sviluppo dei prototipi è stata dedicata particolare attenzione al design dell'antenna, che rappresenta un punto fondamentale per avere delle comunicazioni wireless efficienti, e perciò un corretto monitoraggio eseguito da PULSE. Gli elementi importanti per avere un buon design di antenna non si limitano solo alla scelta del giusto componente ma anche alla corretta progettazione del layout PCB e dell'adattamento d'impedenza, che massimizzano l'efficienza di trasmissione e ricezione del segnale. Nel layout PCB, per un funzionamento efficiente dell'antenna, è importante avere un'adatta ground clearance (un'area priva di piano di massa sotto e attorno al chip) utile ad avere una risonanza corretta, un buon pattern di radiazione e ad evitare i cortocircuiti elettromagnetici. Mentre, per l'adattamento di impedenza è stata scelta una configurazione a T (due induttori e un condensatore), vantaggiosa per la riflessione delle armoniche ed una buona larghezza di banda.



**Figura 4.8:** Circuito Antenna

## 4.2 Sviluppo Firmware

Il firmware è il cuore del sistema di monitoraggio e si occupa della gestione dell'interazione tra sensori, microcontrollore e interfaccia utente. È stato sviluppato per eseguire il campionamento dei dati di tensione, corrente, temperatura e comunicare le informazioni ricevute alla GUI tramite l'interfaccia BLE, con periodicità stabilita in base all'applicazione di impiego del dispositivo e alle necessità di frequenza di monitoraggio.

L'architettura del firmware segue un modello di macchina a stati, modulato in:

- **Acquisizione segnali analogici**
- **Acquisizione segnali digitali**
- **Controllo e protezione**
- **Trasmissione dati BLE**
- **Risparmio energetico**

I segnali analogici provenienti dai sensori vengono acquisiti tramite il modulo ADC interno del microcontrollore, con una risoluzione di 12 bit. Mentre, l'acquisizione della misura di accelerazione avviene attraverso il protocollo seriale I2C. I campionamenti avvengono ogni 10 secondi, grazie ad un timer periodico low power (la frequenza di campionamento può essere riconfigurata in base alle necessità dell'applicazione) e coinvolgono le rilevazioni di temperatura, tensione, corrente e accelerazione. Ogni acquisizione è mediata con una media semplice, in modo da poter ridurre il rumore di misura. Per acquisire le misure analogiche e digitali sono state sfruttate le funzionalità del FreeRTOS con l'utilizzo dei threads e semafori. Quindi, la struttura di gestione real-time è gestita tramite l'avvio dello scheduler (gestore dei processi/task), il quale gestirà un solo task (essendo il microcontrollore un sistema single-core ne potrà gestire solo uno) con due thread (sottoprocessi) di misura temporizzati da un semaforo binario. Il semaforo binario, permette ad ogni thread tramite l'acquisizione e rilascio di esso l'utilizzo delle risorse in modo efficiente e sincronizzato, per far sì che non ci siano accessi simultanei.

I controlli e le protezioni vengono implementati tutti in contemporanea con le acquisizioni, tramite la comparazione tra la misura e le soglie con successiva segnalazione nei bit di stato. Tutte le acquisizioni e i bit di stato vengono comunicati con protocollo BLE insieme alla misura appena rilevata, in modo da permettere all'utente di visionare tempestivamente le rilevazioni di eventuali criticità sulla GUI.

IL BLE rende possibile la trasmissione efficiente e in tempo reale dei parametri acquisiti dal sistema ed è stato scelto per il suo consumo ridotto e la compatibilità con dispositivi mobili. Per utilizzare il protocollo è stato implementato un server GATT (Generic Attribute Profile) per strutturare e ordinare il salvataggio e la trasmissione dei dati di tensione, corrente, temperatura, accelerazione e vettori di stato. Ogni caratteristica è un vettore unsigned di 8 bit, perciò essendo ogni misura espressa su 16 bit unsigned si dovrà scomporre ognuna di essere su due caratteristiche (8 bit MSB e 8 bit LSB) mentre i vettori di stato saranno espressi direttamente su 8 bit. La struttura definita è la seguente

```
// Characteristic 1 Declaration
GATT_BT_ATT( characterUUID,          GATT_PERMIT_READ,
// Characteristic Value 1
GATT_BT_ATT( simpleGattProfile_char1UUID, GATT_PERMIT_READ,
// Characteristic 1 User Description
GATT_BT_ATT( charUserDescUUID,          GATT_PERMIT_READ,
```

Questa porzione di codice implementa una caratteristica nella tabella di attributi del server, cioè la struttura dati che il GATT Server esibisce al GATT Client.

La prima riga contiene:

- UUID (identificatore del tipo di attributo) che identifica la dichiarazione di una caratteristica
- Attribuzione dei permessi
- Puntatore al vettore di proprietà della caratteristica

La seconda riga ingloba:

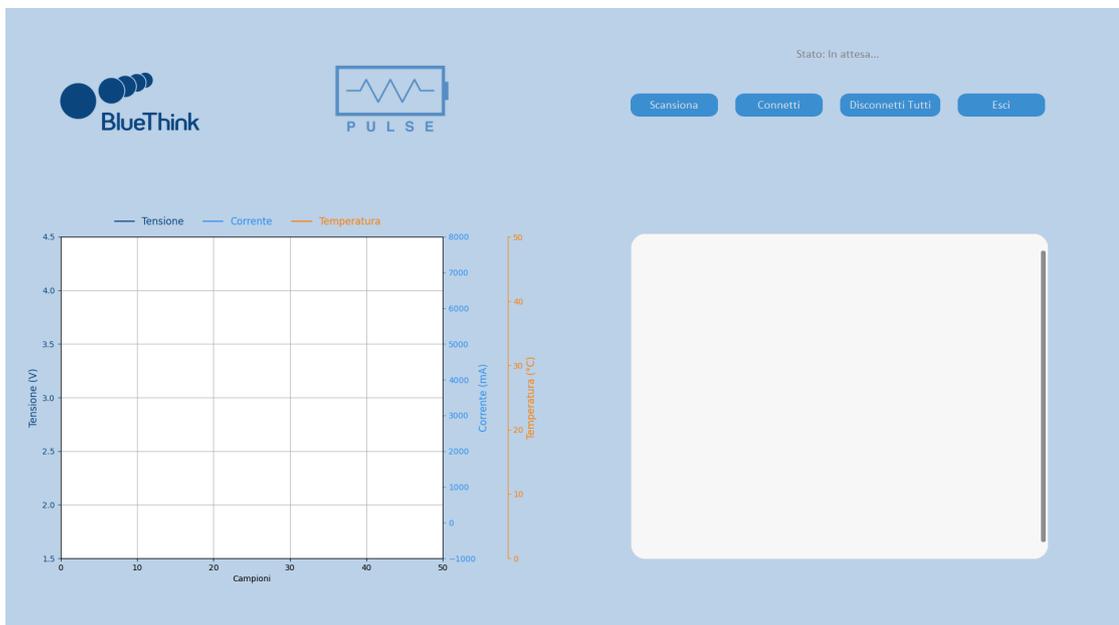
- UUID che identifica il valore di una caratteristica
- Permessi del client sul valore
- Puntatore al valore della caratteristica memorizzato nel GATT server

Mentre, la terza riga include:

- UUID riferito alla descrizione della caratteristica stanziata dall'user
- Permesso per la lettura della descrizione da parte del Client
- Stringa che contiene la descrizione

## 4.3 Sviluppo GUI

Per permettere un monitoraggio in tempo reale accessibile a qualsiasi utente è stata sviluppata un interfaccia grafica utilizzando il linguaggio Python. L'interfaccia si collega al dispositivo PULSE tramite comunicazione Bluetooth Low Energy (BLE), con un interazione semplificata grazie al filtro automatico sui dispositivi rilevabili in modo da poter visionare solo i dispositivi compatibili. Vengono mostrati parametri fondamentali come tensione, temperatura, corrente, SOC ed SOH, con una rappresentazione grafica in tempo reale dei campioni di temperatura, tensione e corrente. Inoltre, è possibile selezionare da un menu a scorrimento i vari dispositivi per poter visionare il grafico corrispondente. Tutta l'interfaccia è stata programmata con un codice modulare in modo da subire con facilità futuri aggiornamenti ed implementazioni.



**Figura 4.9:** Schema interfaccia grafica



Figura 4.10: Connessione con il dispositivo



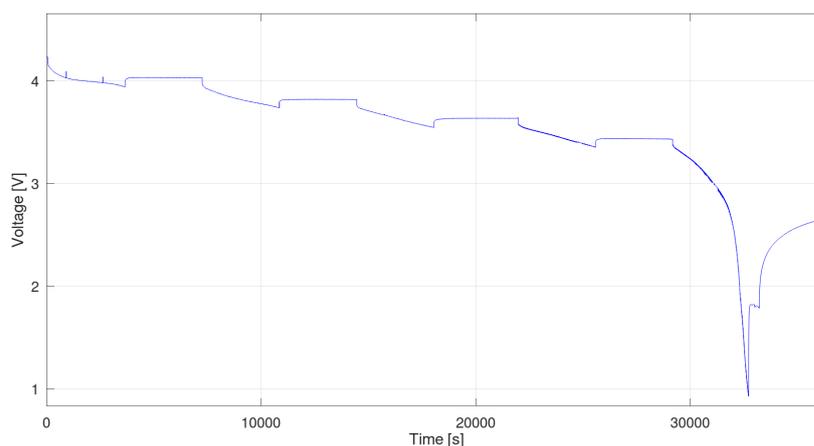
Figura 4.11: Visione dati e grafico in tempo reale

## 4.4 Algoritmo SOC e SOH

La stima dello State of Charge (SOC) e dello State of Health (SOH) è fondamentale per valutare l'utilizzo della batteria ed assicurarne la massima efficienza. All'interno di PULSE è stato implementato un filtro di Kalman esteso (EKF), che consente la stima dinamica e adattiva dello stato della cella utilizzando le misure di tensione e corrente acquisite. Per rappresentare il comportamento dinamico della cella è stato usato un modello di Thevenin del primo ordine (descritto in Algoritmo del filtro di Kalman esteso e applicazione), composto da:

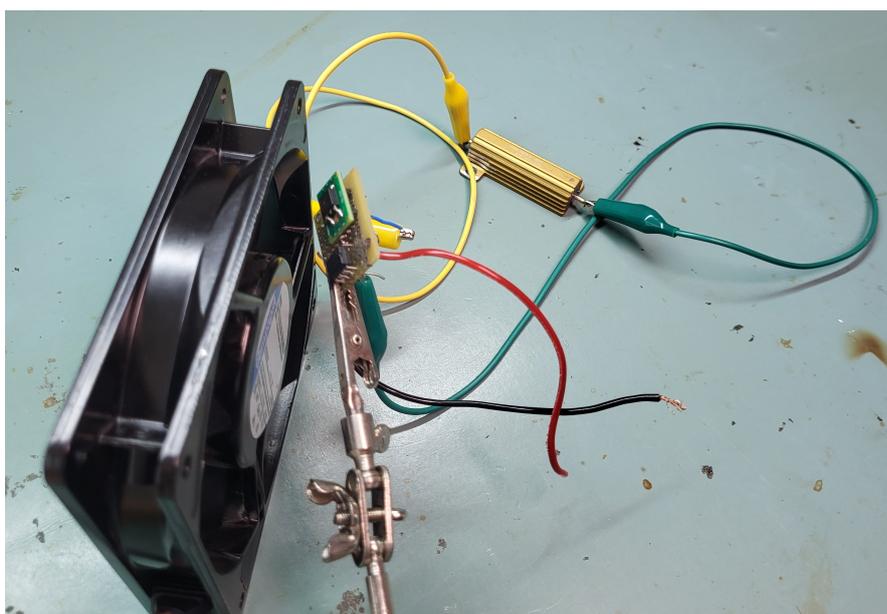
- Una sorgente strettamente correlata allo stato di carica, denominata tensione di circuito aperto (OCV)
- Una resistenza serie che rappresenta parte dell'impedenza interna della cella, in particolare quella istantanea dovuta all'applicazione di una corrente
- Una rete RC che modella la componente dinamica dovuta alla polarizzazione della batteria legata a fenomeni elettrochimici

Le equazioni non lineari del sistema vengono tutte linearizzate al primo ordine ad ogni passo temporale per ottenere la forma compatibile con il filtro di Kalman. Per valutare correttamente l'SOC iniziale sono state realizzate delle funzioni di interpolazione sui punti delle LUT realizzate durante delle scariche controllate, in modo da relazionare l'OCV con l'SOC. Per creare le LUT di riferimento è stata effettuata una scarica a corrente costante con step del 20% (Figura 4.12) tramite un carico elettronico.



**Figura 4.12:** Scarica a corrente costante

Il carico elettronico è stato realizzato in una versione base con componenti discreti, mostrato in Figura 4.13, e l'utilizzo di una ventola per stabilizzare la temperatura del MOSFET. È importante che la temperatura sia stabile per evitare instabilità di funzionamento del MOSFET, che con temperature crescenti aumenta la sua produzione di energia in calore e varia i suoi parametri elettrici. Essendo guidato da un comparatore di soglia con soglia fissa, la stabilità del MOSFET è importante per la precisione della corrente assorbita dal carico.



**Figura 4.13:** Circuito di scarica a corrente costante

Per la valutazione dello SOH è stato implementato un algoritmo di stima online inserito nello stesso filtro di Kalman esteso dell'SOC. L'algoritmo utilizzato sfrutta la relazione tra l'invecchiamento della cella e la variazione della resistenza interna, la quale incrementa per l'ispessimento del SEI (strato passivante posto sull'elettrodo negativo per impedire il continuo contatto tra litio ed elettrolita, il quale causerebbe reazioni parassite e possibili cortocircuiti interni) causato dal deterioramento della batteria.

Una volta stimata la resistenza l'algoritmo comparerà il valore ottenuto con la resistenza nominale definita dal costruttore. La scelta dell'algoritmo di SOC è stata determinata dalla scarsa disponibilità di dati di caratterizzazione della correlazione tra OCV ed SOC della cella. Perciò, nonostante la bassa quantità di dati è stato possibile realizzare una buona stima dello SOC guidata e filtrata da un filtro di Kalman robusto, che sfrutta le informazioni di corrente, tensione e modello della cella.

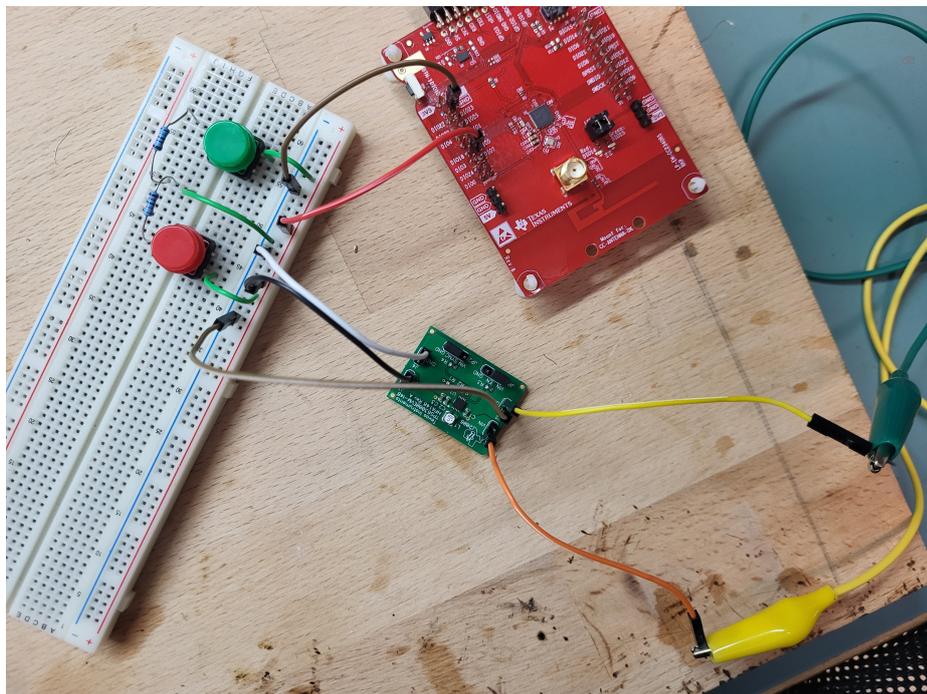
Mentre, per quanto riguarda l'algoritmo di SOH si è scelta una stima online più flessibile rispetto ai metodi offline, che nonostante possa presentare un aumento di errore numerico o errori di propagazione permette di avere valutazioni tempestive con un trend osservabile ed utile a poter prendere delle decisioni sul sistema.

Inoltre, seppur questa scelta presenta una precisione non comparabile con le caratterizzazioni fatte in laboratorio, permette di stimare l'SOH durante l'uso operativo della batteria.

## Capitolo 5

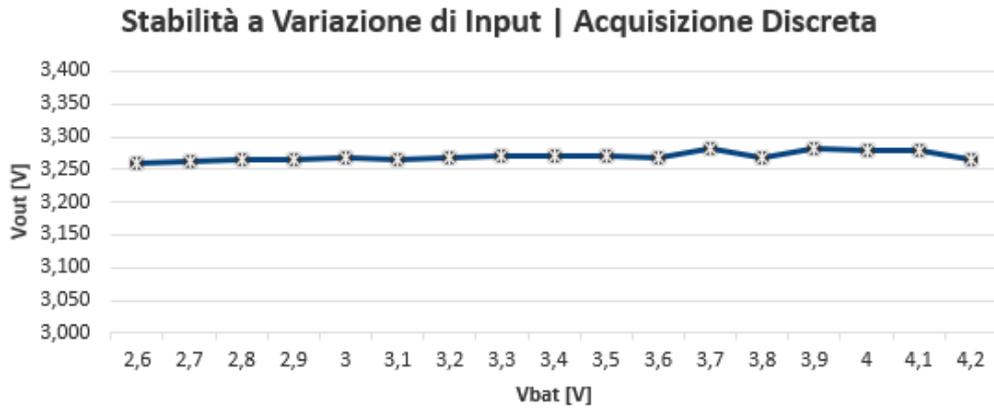
# Verifica e validazione

Un'altra importante fase del progetto PULSE è stata la validazione perché è stata importante per valutare i giusti componenti da inserire nel sistema, la creazione di circuiti e la verifica del funzionamento del sistema secondo gli obiettivi prefissati. Perciò in questa sezione verranno descritti i test eseguiti per garantire un sistema funzionante. L'analisi fatta per creare il sistema è iniziata dalla sua alimentazione con dei test sul Buck-Boost, in modo da poter verificare il suo corretto lavoro in diverse condizioni di carico e input.

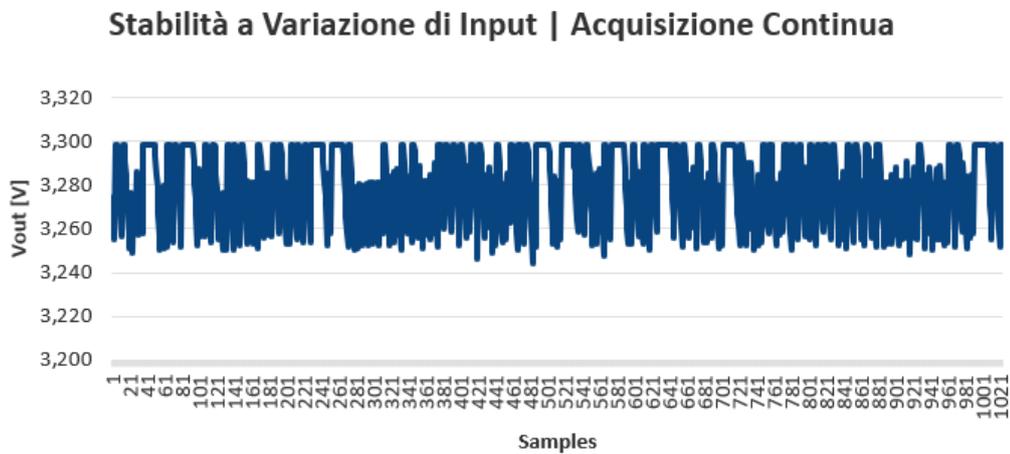


**Figura 5.1:** Setup di test per la validazione del Buck-Boost

Nella Figura 5.1 viene mostrato il setup utilizzato per testare il Buck-Boost, composta da 2 resistenze di carico attaccate e staccate tramite degli switch dall'evalboard del microcontrollore e dal Buck-Boost, il quale è connesso ad un alimentatore con cui viene variata la tensione di ingresso da dover stabilizzare. Il test viene svolto campionando l'uscita del modulo Buck-Boost tramite uno dei canali ADC del microcontrollore che poi passa i dati ad un PC tramite UART.



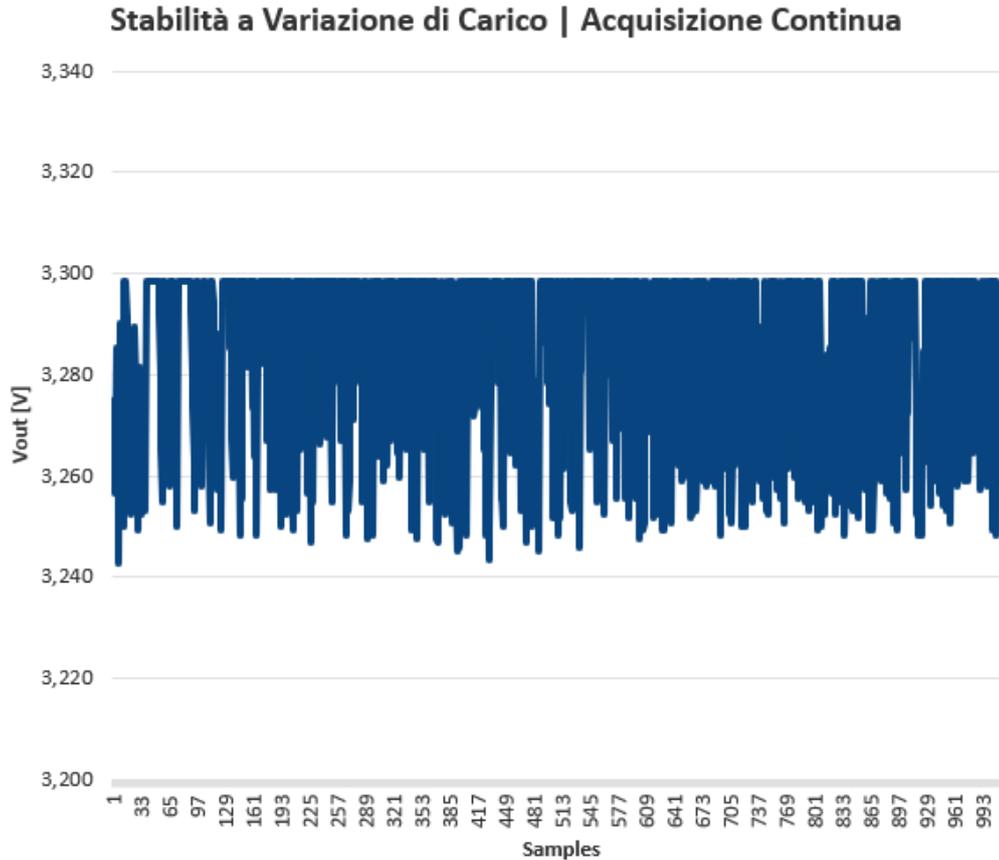
**Figura 5.2:** Test discreto con variazione di input



**Figura 5.3:** Test continuo con variazione di input

I risultati ottenuti da questo primo test mostrano come l'alimentazione in uscita

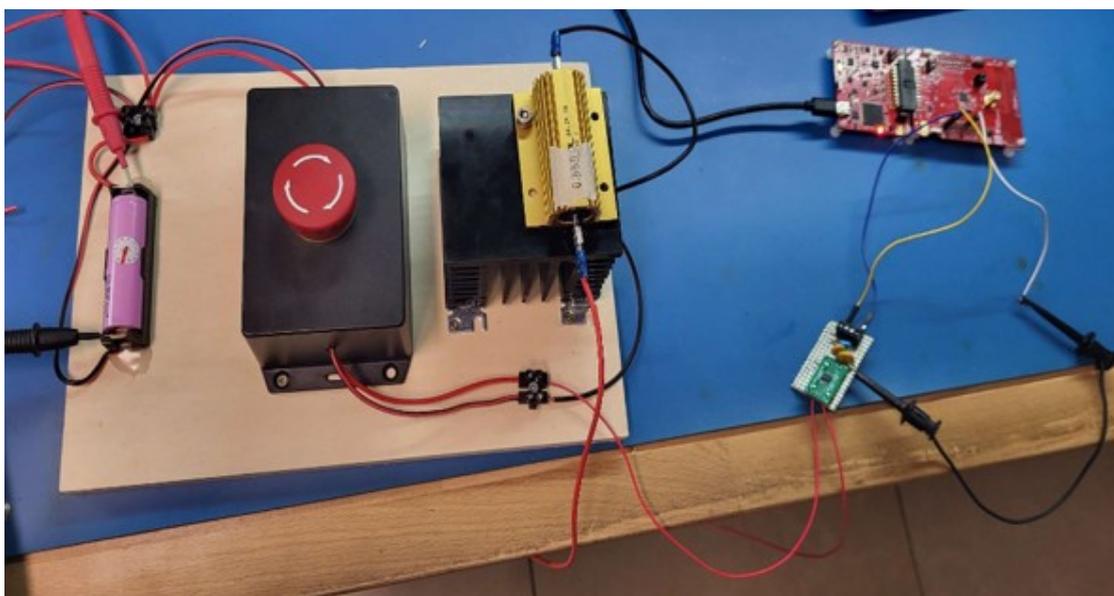
dal Back-Boost rimanga stabile mentre si hanno variazioni di input. Le oscillazioni osservate nel test sono dovute alla saturazione dell'ADC.



**Figura 5.4:** Test continuo con variazione di carico

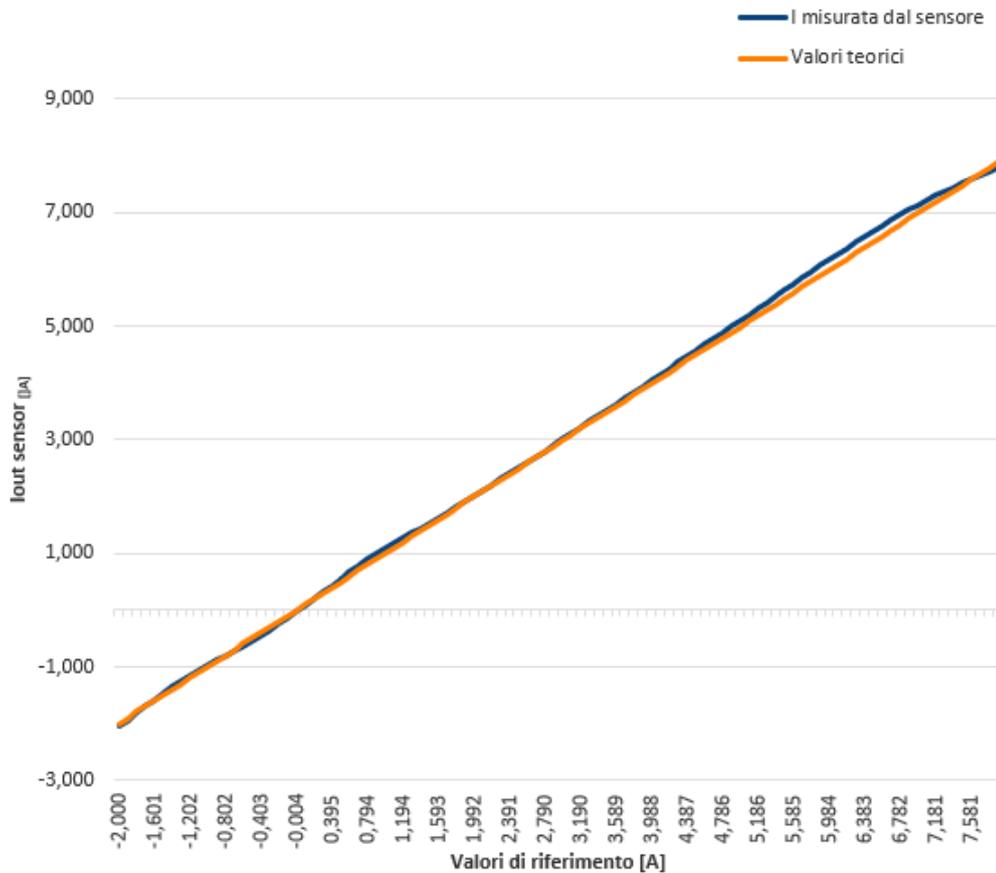
Il test successivo ha verificato la stabilità di alimentazione indipendentemente dal carico presente in uscita. Anche questa misura presenta delle oscillazioni per la saturazione del canale ADC. Tutte le misure effettuate sono state verificate ripetutamente anche con oscilloscopio e multimetro.

In seguito sono stati validati i chip utili alla misura dei parametri di cella come la corrente e l'accelerazione. Per la misura di corrente è stato implementato il setup in Figura 5.5, contenente una cella agli ioni di litio, una serie di resistenze corazzate che permettono di testare diverse correnti di carico, un evalboard del microcontrollore, un dissipatore termico, un emergency stop, 2 tester e il circuito dell'Hall sensor.



**Figura 5.5:** Setup di test per il sensore di corrente ad effetto Hall

Il test è composto di prove svolte ripetutamente con il campionamento dell'ADC, il quale trasmette i dati tramite protocollo UART. La tensione della cella è continuamente monitorata tramite un tester, mentre un secondo è utilizzato in serie al carico. Dai risultati si è notato che inserire il tester in serie al carico per misurare la corrente porta alla riduzione della corrente prodotta, per l'effetto di carico da lui generato. Una volta concluse tutte le prove sono stati ottenuti i seguenti risultati in Figura 5.6.



**Figura 5.6:** Caratteristica di corrente ottenuta dal chip ad effetto Hall

Infine, è stato testato l'accelerometro per poter utilizzare la modalità più consona alle finalità del prototipo. L'interfacciamento è avvenuto con il protocollo I2C, tramite cui sono stati configurati tutti i registri di controllo e la modalità. La modalità scelta è quella di wakeup, la quale utilizza degli interrupt generati grazie al superamento delle soglie di accelerazione di almeno uno dei 3 assi (le soglie sono impostate tramite i registri nella configurazione iniziale). L'interrupt si interfaccia con una GPIO del microcontrollore per poter generare la comunicazione dei dati di accelerazione salvati nei registri dell'accelerometro.

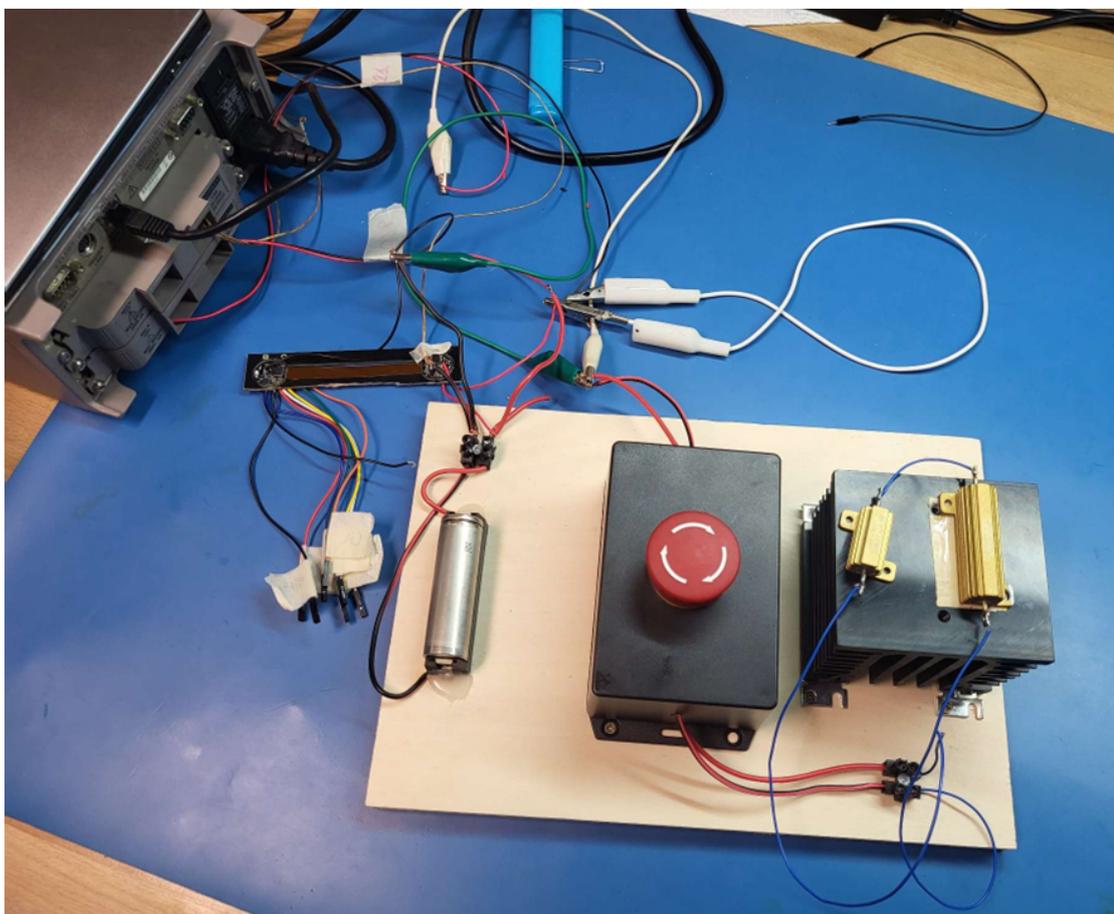
```
Temperatura cella: 914 C°  
Tensione cella: 2381312 uV  
Corrente cella: -4020 mA  
Temperatura cella: 1147 C°  
Tensione cella: 2383744 uV  
Corrente cella: -4075 mA  
Temperatura cella: 1549 C°  
Tensione cella: 2382128 uV  
Corrente cella: -4148 mA  
Temperatura cella: 1787 C°  
Tensione cella: 2381928 uV  
Corrente cella: -4166 mA  
Temperatura cella: 2014 C°  
Detected START_RES_FRON_X sensor with slave address 0x33  
Acceleration is -> x: -3 mg y: -78 mg z: 566 mg  
Tensione cella: 2379712 uV  
Corrente cella: -4581 mA  
Temperatura cella: 2014 C°  
Tensione cella: 2389376 uV  
Corrente cella: -4404 mA
```

Figura 5.7: Test accelerometro

Dal test effettuato si nota come l'accelerometro intervenga per segnalare i valori rilevati durante la trasmissione dei parametri di cella.

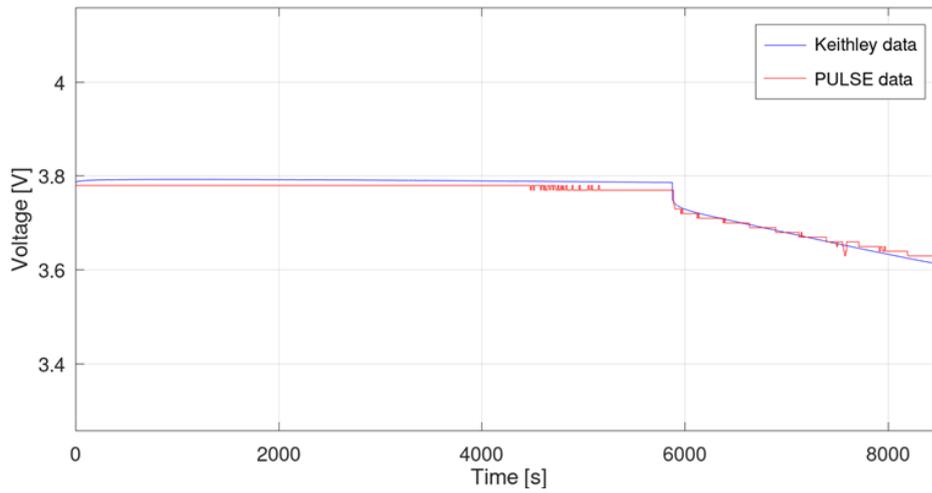
Una volta validati i componenti si è proceduto alla verifica del sistema completo tramite il setup in Figura 5.8. Il setup include:

- Resistenze corazzate
- Emergency stop
- Dissipatore termico
- Prototipo PULSE
- Cella cilindrica agli ioni di litio formato 18650
- DMM

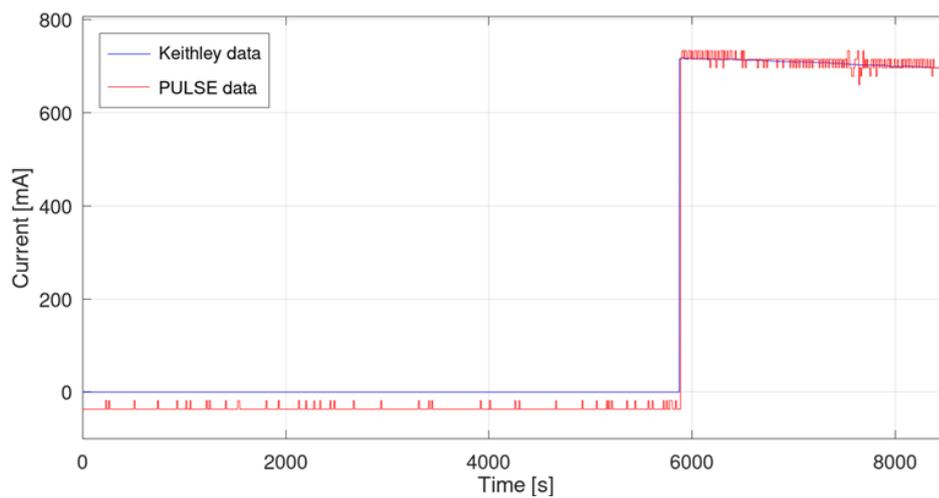


**Figura 5.8:** Setup per il test di sistema

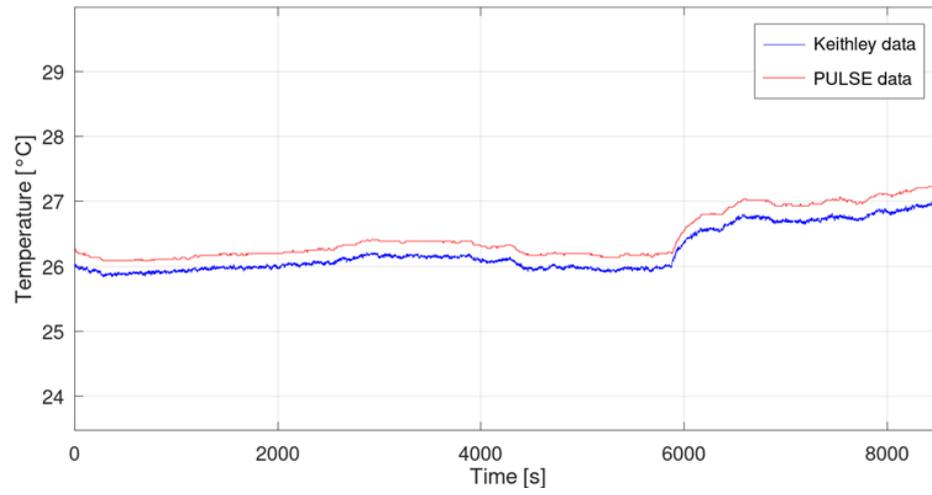
Dai test si è dedotto un comportamento corretto del sistema con la necessità di calibrazione (come si può evincere dai grafici di test).



**Figura 5.9:** Test della tensione



**Figura 5.10:** Test della corrente



**Figura 5.11:** Test della temperatura

## Capitolo 6

# Conclusioni

Il lavoro di tesi svolto in azienda presso la sede BlueThink di Milano, si è focalizzato sullo sviluppo di un sistema wireless per il monitoraggio in tempo reale dei parametri di una cella agli ioni di litio, con invio dei dati su cloud. Questa tipologia di monitoraggio è molto importante per prolungare la vita operativa, massimizzare le prestazioni e per utilizzare la batteria in sicurezza in applicazioni come l'energia fotovoltaica, industria, storage e mobilità elettrica.

Il progetto ha portato alla realizzazione di due prototipi funzionanti con precisione elevata di monitoraggio dei parametri di cella e comunicazione dei dati ad una GUI dedicata. Il dispositivo PULSE è in grado di rilevare tempestivamente le condizioni di pericolo della batteria come sovraccorrente, sovratensione, sottotensione e temperature al di fuori delle soglie, contribuendo a rendere il sistema sicuro ed efficiente.

Dal punto di vista predittivo, è stato ottenuto un algoritmo di SOC che permette di ottenere una stima dello stato di carica affidabile grazie al filtro implementato, che guida il calcolo anche in condizioni sconosciute di stato iniziale della cella. Inoltre, si è aggiunto un algoritmo di SOH che pur avendo una precisione inferiore rispetto ad una stima offline, permette di avere un'analisi in tempo reale e rapida con necessità di bassa potenza di calcolo.

In conclusione, i risultati ottenuti dimostrano come un approccio integrato e compatto possa fornire soluzioni di monitoraggio predittivo, facilmente integrabili nei processi di produzione e assemblaggio di pacchi batteria.

Il traguardo raggiunto pone le basi per lo sviluppo di un dispositivo wireless resistente a condizioni estreme come quelle in ambito automotive, grazie all'utilizzo esclusivo di componenti conformi agli standard automotive. Inoltre, il design

realizzato per il sistema è adattabile a diverse forme di cella con riusabilità anche dopo la fine di vita della batteria, favorendo sostenibilità e flessibilità.

# Ringraziamenti

Concludere questo percorso universitario rappresenta per me non solo un traguardo accademico, ma anche un momento pieno di ricordi, fatica e crescita. Non sarei mai arrivato fin qui da solo, ed è con profonda gratitudine che desidero dedicare queste righe a chi ha camminato al mio fianco in questi anni.

Ringrazio l'azienda BlueThink S.p.A. per avermi dato l'opportunità di svolgere questo lavoro in un ambiente stimolante e dinamico. In particolare, il mio più sincero ringraziamento va a Matteo, che mi ha affiancato giorno dopo giorno con pazienza, professionalità e fiducia. La sua disponibilità, i consigli, la sua capacità di farmi sentire parte del team fin da subito sono stati fondamentali per la riuscita del progetto, ma anche per il mio percorso personale e professionale. Non dimenticherò ciò che mi ha insegnato, né i momenti di confronto e crescita condivisi.

Un ringraziamento profondo va alla mia famiglia, che è stata la mia roccia in ogni fase di questo percorso. Grazie per aver creduto in me anche quando io stesso facevo fatica a farlo. Grazie per il supporto dato in ogni momento di difficoltà, per l'ascolto, per i sacrifici e per i pacchi da giù che mi hanno sempre fatto sentire tutto il vostro affetto e la vicinanza di casa.

Grazie a Iolanda, Celestino, Loredana, Massimo e tutti i miei cugini per essermi stati vicini e per avermi trattato come se fossi un vostro figlio.

In modo particolare, voglio dedicare un pensiero a nonna Maria, per la sua dolcezza, la sua forza e per la speranza che riusciva ad infondermi. La sua presenza e le sue parole sono state tanto importanti per avere più fiducia in me stesso e meno paura nel futuro. Anche se non sei più qua ti porterò sempre nel mio cuore.

Grazie ai miei compagni di corso, che in questi anni sono diventati molto più che semplici colleghi. Abbiamo condiviso aule, laboratori, ansie da esame, notti insonni, ma anche tante risate, momenti di leggerezza e soddisfazioni. Insieme abbiamo reso questo viaggio più umano, più sopportabile, e molto più bello di quanto potessi

immaginare.

Grazie a Nepo, che è diventato come un fratello ed è sempre presente nonostante i tanti chilometri che ci separano. Hai reso più leggeri i momenti di difficoltà e riterrò sempre incredibile quanto la nostra vicinanza riduca il nostro quoziente intellettivo a zero.

E infine, un ringraziamento che sento profondamente: a me stesso. Per non aver mollato quando sarebbe stato più facile farlo. Per aver creduto, almeno un po', che ce l'avrei fatta. Per aver affrontato momenti di incertezza, fallimenti, ostacoli e paure con tanta determinazione. Mi riconosco ogni sforzo fatto, ogni sera passata a studiare, ogni dubbio trasformato in motivazione. Questo traguardo è anche il frutto di quella parte di me che ha resistito, anche nei giorni più difficili.

Grazie a tutti quelli che hanno fatto parte di questo viaggio. Questa tesi porta dentro anche un po' di ciascuna delle persone che ho incontrato lungo questo cammino. Ognuno, a suo modo, mi ha insegnato qualcosa, mi ha fatto crescere e mi ha reso una persona migliore. Vi voglio bene.

# Bibliografia

- [1] I. Buchmann. *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers, Fourth Edition*. Richmond, British Columbia, Canada: Cadex Electronics Inc., 2017 (cit. alle pp. 3–6).
- [2] Isidor Buchmann. *BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries*. 2021-10-21. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries> (visitato il giorno 24/04/2025) (cit. alle pp. 6, 7).
- [3] Gregory L. Plett. *Battery Management Systems, Volume 1, Battery Modeling*. Canton Street Norwood, MA 02062: Artech House, 2015 (cit. alle pp. 9, 10).
- [4] Ali Emadi. *Advanced Electric Drive Vehicles*. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300: Taylor & Francis Group, 2015 (cit. a p. 10).
- [5] Trittek. *La sicurezza della batteria agli ioni di litio: devi preoccuparti?* URL: <https://tritekbattery.com/it/the-safety-of-lithium-ion-batteries-do-you-need-to-worry/> (visitato il giorno 28/04/2025) (cit. alle pp. 11, 12).
- [6] Isidor Buchmann. *BU-301a: Types of Battery Cells*. 2019-04-24. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells> (visitato il giorno 30/04/2025) (cit. alle pp. 13, 14).
- [7] Carla Menale Roberto Bubbico Viviana Greco. «Applicazione di metodologie standardizzate di analisi di rischio a sistemi di accumulo elettrochimico al fine di identificare le principali condizioni di pericolo, e definizione della procedura di applicazione a sistemi di accumulo realizzati con tecnologie litio-ione». In: *Report Ricerca di Sistema Elettrico* (2016) (cit. alle pp. 15, 16).
- [8] Gabriel A. Rincón-Mora Min Chen. «An Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance». In: *IEEE Transactions on Energy Conversion* (2006) (cit. alle pp. 16–19).

- 
- [9] Embedded One, Inc. *Evolution of Battery Management Systems: from Simple Protection to Advanced Optimization*. 2022-02-15. URL: <https://www.embeddedone.com/blog/evolution-of-battery-management-systems-from-simple-protection-to-advanced-optimization> (visitato il giorno 07/05/2025) (cit. a p. 20).
- [10] Monolithic Power Systems. *Role and Importance of BMS*. 2023. URL: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/battery-management-systems/bms-basics/role-and-importance-of-bms> (visitato il giorno 07/05/2025) (cit. alle pp. 20–22).
- [11] *Battery Management System Tutorial*. White Paper. Renesas Electronics America Inc., 2018 (cit. alle pp. 23, 24).
- [12] Gregory L.Plett. «Battery Management Systems, Volume II: Equivalent-Circuit Methods». In: Norwood, MA: Artech House, 2016. Cap. 1.5 (cit. alle pp. 24–30).
- [13] Monolithic Power Systems. *Understanding the Role of a Battery Management System (BMS) in Electric Vehicles*. 2024. URL: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/understanding-the-role-of-a-battery-management-systems-in-electric-vehicles> (visitato il giorno 14/05/2025) (cit. a p. 27).
- [14] Monolithic Power Systems. *The Importance of State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) in Battery Management Systems*. 2024. URL: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/the-importance-of-state-of-charge-and-state-of-health-in-battery-management-systems> (visitato il giorno 23/05/2025) (cit. alle pp. 30, 31).
- [15] Martin Murnane, Adel Ghazel. *"A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries"*. 2023. URL: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/a-closer-look-at-state-of-charge-and-state-health-estimation-tech.html> (visitato il giorno 24/05/2025) (cit. alle pp. 32–42, 45, 46).
- [16] Monolithic Power Systems. *Battery Estimations*. 2024. URL: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/battery-management-systems/bms-functionalities/battery-estimations> (visitato il giorno 02/06/2025) (cit. a p. 46).
- [17] Bacancy. *Everything You Need To Know About Cell Balancing*. 2024. URL: <https://bacancysystems.com/blog/cell-balancing-and-its-types> (visitato il giorno 03/06/2025) (cit. alle pp. 48, 49).
- [18] Bhooshan Rajpathak Amar Nath. «Analysis Of Cell Balancing Techniques In BMS For Electric Vehicle». In: *IEEE Xplore* (2022) (cit. alle pp. 48–53).