



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCATRONICA

---

*TESI DI LAUREA MAGISTRALE*

Stima dello stato di salute delle batterie agli ioni  
di litio nei veicoli elettrici attraverso i sistemi di  
ricarica

*Relatore:* Prof. Paolo Mattavelli

*Laureando:* Andrea Zilio  
1192099-IMC

ANNO ACCADEMICO: 2019-20



## SOMMARIO

---

A differenza di un paio d'anni fa, al giorno d'oggi non è più raro vedere circolare per le strade autovetture elettriche. Basti pensare che in Italia nel 2019 sono stati venduti 10566 veicoli elettrici con un incremento del 110% rispetto all'anno precedente. Neppure la pandemia di SARS-CoV-2 è riuscita a scalfire questo trend dato che, dalle prime stime, tale andamento è stato confermato pure per il 2020.

La rapida diffusione dei veicoli elettrici è dovuta alle sempre più stringenti norme antinquinamento, che obbligano le case automobilistiche, a trovare delle alternative ai classici motori a combustione interna. D'altro canto neppure le autovetture elettriche sono esenti da questi problemi. Infatti le batterie, solitamente agli ioni di litio, contengono materiale di difficile reperibilità e altamente inquinante.

In questo lavoro si è studiata e sviluppata una tecnica di stima dello stato di salute di un accumulatore agli ioni di litio sfruttando la spettroscopia d'impedenza. L'idea innovativa è stata quella di implementare tale tecnica all'interno di una stazione di ricarica in modo tale che la colonnina, oltre alla funzione base per cui è stata progettata, restituisca informazioni sullo stato di salute dell'accumulatore.

L'elaborato è suddiviso in cinque capitoli: nel primo sono riportate le caratteristiche fondamentali di un veicolo elettrico, per esempio la descrizione dell'infrastruttura di ricarica; nel secondo sono descritti gli accumulatori agli ioni di litio e la loro organizzazione all'interno del pacco batteria di un veicolo elettrico; nel terzo capitolo è riportato lo stato dell'arte delle attuali tecniche per la stima dello stato di salute e la descrizione della spettroscopia d'impedenza; nel quarto capitolo è presente, rispettivamente, una descrizione della procedura seguita nelle prove sperimentali e i relativi dispositivi utilizzati. Infine, nell'ultimo capitolo, sono riportati i risultati sperimentali ottenuti.

Nella prima parte dell'esperienza di laboratorio sono state eseguite delle prove per la caratterizzazione di una cella agli ioni di litio. I dati raccolti sono stati utilizzati per la programmazione e la progettazione dell'insieme delle periferiche necessarie per eseguire i test di invecchiamento e la spettroscopia d'impedenza, in modo automatico e ad intervalli prefissati.



## INDICE

---

1	ASPETTI FONDAMENTALI DEI VEICOLI ELETTRICI	1
1.1	Norme Tecniche	2
1.2	Stazioni di ricarica	3
1.3	Tipi e Modi di ricarica	4
1.4	Connettori	7
1.4.1	Connettori basici	8
1.4.2	Connettori in corrente continua	11
1.4.3	Connettore combinati	12
1.5	Il mercato dell'elettrico oggi	14
1.6	Protocolli di comunicazione	16
1.7	Componenti di un sistema di ricarica	20
1.7.1	On-board Charger (Singolo Stadio)	21
1.7.2	On-board Charger (Doppio Stadio)	25
1.7.3	Integrated on-board charger	30
1.7.4	Stazioni Fast e Ultra Fast	32
2	ARCHITETTURA DELL'ACCUMULATORE	39
2.1	La batteria	39
2.1.1	Parametri di una batteria	39
2.2	Batteria agli ioni di Litio	43
2.3	Configurazione pacco batteria	48
2.4	BMS (Battery Management System)	52
2.4.1	Tipologie di BMS	55
2.4.2	Bilanciamento	57
3	STIMA DELL'INVECCHIAMENTO DELL'ACCUMULATORE	61
3.1	SOH - State of Health	61
3.2	Analisi dei parametri che influenzano l'invecchiamento	62
3.2.1	Tecniche per ritardare l'invecchiamento	65
3.3	Tecniche di stima dell'invecchiamento	65
3.3.1	Stima del SOH con rete neurale	66
3.3.2	Stima del SOH attraverso una stima della capacità	68
3.4	Spettroscopia d'impedenza elettrochimica	69
3.5	Modellizzazione di una cella	72
3.6	Parametri della batteria in funzione dell'invecchiamento	76
4	SPETTROSCOPIA NEI VEICOLI ELETTRICI E STRUMENTAZIONE DI PROVA	81
4.1	Implementazione della EIS	81
4.2	Progettazione del caricatore con EIS	82
4.2.1	Sintesi del controllore di corrente	83
4.2.2	Scelta del segnale di eccitazione	85

4.2.3	Simulazione della spettroscopia	86
4.2.4	Stima dei parametri del modello con Matlab®	90
4.2.5	Simulazione del processo di carica e scarica	90
4.3	Strumentazione di prova	92
4.3.1	Procedura di prova	96
4.4	Interfaccia LabView	97
4.5	Progettazione della scheda di controllo	101
4.5.1	Progettazione del circuito di amplificazione	102
4.5.2	Sensore di corrente	108
4.5.3	Amplificatore per strumentazione	108
4.5.4	Scheda elettronica progettata	109
5	PROVE SPERIMENTALI	113
5.1	Prove di caratterizzazione di base	113
5.1.1	Carica	113
5.1.2	Scarica	115
5.1.3	Stima dei parametri	120
5.2	Test dell'algoritmo per l'esecuzione della spettroscopia	125
5.3	Prove d'invecchiamento	127
	Conclusioni	131
	BIBLIOGRAFIA	133

## ELENCO DELLE FIGURE

---

Figura 1	Tipo A [1].	4
Figura 2	Tipo B [1].	4
Figura 3	Tipo C [1].	5
Figura 4	Connettore Tipo 1 [8].	9
Figura 5	Connettore Tipo 2 [8].	10
Figura 6	Connettore Tipo 3 [8].	11
Figura 7	Connettore CHAdeMO [8].	12
Figura 8	Configurazione BB [8].	12
Figura 9	CCS Combo 1 [8]	13
Figura 10	CCS Combo 2 [8]	14
Figura 11	Segnale PWM [10].	17
Figura 12	Componenti di un sistema di ricarica [12].	20
Figura 13	On-Board Charger a Singolo stadio [12].	21
Figura 14	Convertitore Boost [4].	22
Figura 15	Convertitore Half Bridge.	22
Figura 16	Convertitore Full Bridge monofase.	23
Figura 17	Convertitore a 3 livelli diode-clamped trifase [4].	23
Figura 18	Configurazione caricatore on-board da 3.7 kW a singolo stadio [13].	24
Figura 19	Struttura convertitore a due stadi [13].	26
Figura 20	Configurazione caricatore on-board da 3.3 kW [14].	26
Figura 21	Configurazione caricatore on-board da 6.6 kW [15].	27
Figura 22	Configurazione caricatore on-board da 20 kW [16].	29
Figura 23	Caricatore on-board integrato usando gli avvolgimenti trifase del motore [20].	31
Figura 24	Caricatore on-board integrato basato sull'ampliamento dell'inverter [20].	32
Figura 25	Configurazione stazione di ricarica fast/ultra fast [21].	33
Figura 26	Caricatore fast da 100kW [22].	34
Figura 27	Caricatore ultra fast da 250 kW [23].	35
Figura 28	Componenti caricatore ultra fast da 250 kW.	36
Figura 29	Principio di funzionamento di una batteria agli ioni di litio [27].	44
Figura 30	Configurazione delle celle di batterie Li-ion [30].	45
Figura 31	Curve caratteristiche delle batterie Li-ion [27].	46
Figura 32	Posizionamento pacco batterie	49

Figura 33	Tappo di sicurezza di una cella 18650 [31].	49
Figura 34	Configurazione celle [33].	51
Figura 35	BMS centralizzato [34].	56
Figura 36	BMS master-slave modulare [34].	56
Figura 37	Bilanciamento passivo con rete resistiva [37].	58
Figura 38	Bilanciamento attivo con rete capacitiva [37].	58
Figura 39	Bilanciamento attivo con una rete di convertitori [37].	59
Figura 40	Andamento della capacità al variare del numero di cicli [39].	63
Figura 41	Diminuzione della capacità per effetto della temperatura [39].	64
Figura 42	Schema della rete neurale MLP [41].	66
Figura 43	Profili utilizzati per l'addestramento della rete neurale [41].	67
Figura 44	Profilo di carica utilizzato per la stima del SOH [42].	69
Figura 45	Diagramma di Nyquist di un gruppo RC ideale.	71
Figura 46	Descrizione del circuito equivalente associato ad ogni elemento in una cella [46].	72
Figura 47	Diagramma di Nyquist dell'impedenza ZARC.	73
Figura 48	Modello equivalente della batteria [48].	74
Figura 49	Diagramma di Nyquist dell'impedenza del modello di una batteria [48].	75
Figura 50	Diagrammi di Nyquist della cella a inizio e fine vita [49].	77
Figura 51	Variazione dell'impedenza per effetto dell'invecchiamento [49].	77
Figura 52	Andamento dei valori della resistenza al variare del numero dei cicli e dello stato di carica [49].	78
Figura 53	Andamento delle principali resistenze per effetto dell'invecchiamento [49].	79
Figura 54	Dipendenza di $R_{ohm}$ dalla temperatura [50].	79
Figura 55	Dipendenza di $R_{CT}$ dalla temperatura [50].	80
Figura 56	Schema a blocchi di un caricatore con EIS.	82
Figura 57	Convertitore Buck bidirezionale.	82
Figura 58	Schema a blocchi utilizzato per la sintesi del controllore di corrente.	84
Figura 59	Test di funzionamento dell'anello di corrente. Il segnale di riferimento è dato dalla somma di quattro sinusoidi ognuna di ampiezza 200 mA e di frequenza $f = 250, 500, 1000, 1500$ Hz.	85
Figura 60	Circuiti di test per il caricatore EIS.	87

Figura 61	Confronto tra il diagramma di Nyquist teorico e quello ottenuto per punti attraverso la EIS per il modello del primo ordine. 88
Figura 62	Confronto tra il diagramma di Nyquist teorico e quello ottenuto per punti attraverso la EIS per il modello del secondo ordine. 88
Figura 63	Stima dei parametri del modello equivalente della batteria con ZView®. 89
Figura 64	Anello di controllo della tensione di uscita con implementato una tecnica per la desaturazione dell'azione integrale. 91
Figura 65	Simulazione del processo di carica a 1C. 92
Figura 66	Simulazione del processo di scarica a 2.6 A e 4 A. 93
Figura 67	Setup sperimentale del banco di prova. 93
Figura 68	Diagramma di flusso del test. 97
Figura 69	Interfaccia LabView dell'alimentatore controllato CPX400DP. 98
Figura 70	Interfaccia LabView del carico attivo DL300A 99
Figura 71	Interfaccia LabView FPGA I/O 100
Figura 72	Struttura della scheda elettronica progettata. 102
Figura 73	Schema di funzionamento del DC Servo 103
Figura 74	DC Servo non invertente progettato 104
Figura 75	Funzionamento del TDA7294 a fronte di un ingresso sinusoidale con $V_{pp}=2\text{ V}$ e frequenza di 1 Hz. 105
Figura 76	Andamento della tensione del DC Servo riferita a massa e della corrente iniettata nella cella durante il transitorio di avvio del DC Servo. 106
Figura 77	Schema di pilotaggio dei relè. 106
Figura 78	Schematico blocco di amplificazione TDA7294. 107
Figura 79	Amplificatore di strumentazione con filtro passa basso e passa alto. 109
Figura 80	Psb realizzata con il programma di progettazione elettronica Eagle®. 110
Figura 81	Tensioni e correnti durante la fase di carica composta da una fase a corrente costante seguita da una a tensione costante. 114
Figura 82	Andamento della capacità durante la fase di carica. 115
Figura 83	Grafico Tensione-Tempo della scarica a corrente costante fino alla tensione di cut-off pari a 2.8 V. 116

Figura 84	Grafico Tensione-Capacità della scarica a corrente costante fino alla tensione di cut-off pari a 2.8 V. 117
Figura 85	Grafico Tensione-Energia della scarica a corrente costante fino alla tensione di cut-off pari a 2.8 V. 118
Figura 86	Rendimento energetico e amperometrico. 119
Figura 87	Andamento della tensione in funzione del tempo nella prova per la stima della $V_{OCV}$ in funzione del SOC, la scarica è avvenuta con una corrente costante pari a 1 A. 121
Figura 88	Tensione a circuito aperto in funzione dello stato di carica. 122
Figura 89	Gradino di corrente generato dal carico attiva e corrispettiva risposta in tensione della cella. 123
Figura 90	Gradino di corrente generato dal carico attivo e corrispettiva risposta in tensione della cella. 124
Figura 91	Interfaccia di controllo in LabView utilizzata per la verifica del funzionamento dell'algoritmo per l'esecuzione della spettroscopia. 126
Figura 92	Diagramma di Bode sperimentale del filtro passa basso del primo ordine. 127
Figura 93	Interfaccia LabView per le prove d'inecchiamento. 128

## ELENCO DELLE TABELLE

---

Tabella 1	Comparazione tra i modi di ricarica [3]. 6
Tabella 2	Comparazione tra On-Board e Off-Board Charger [4] 7
Tabella 3	Modi di ricarica e connettori 14
Tabella 4	Caratteristiche vetture elettriche più vendute in Italia nel 2019. 15
Tabella 5	Stati di carica richiesti [1]. 18
Tabella 6	Stati di funzionamento [13]. 25
Tabella 7	Specifiche caricatore on-board da 3.7 kW singolo stadio [13]. 25
Tabella 8	Specifiche caricatore on-board da 3.3 kW [14]. 27
Tabella 9	Specifiche caricatore on-board da 6.6 kW [15]. 28
Tabella 10	Specifiche caricatore on-board da 20 kW [16]. 30
Tabella 11	Datasheet on-board charger [17][18][19]. 30

Tabella 12	Comparazione tra configurazione di bus	34
Tabella 13	Specifiche caricatore ultra fast da 250 kW [23].	37
Tabella 14	Datasheet stazioni ultra fast [24][25][26].	37
Tabella 15	Comparazione tra le batterie Li-ion e altre tipologie [27].	48
Tabella 16	Comparativa tra celle cilindriche 18650 e 21700.	50
Tabella 17	Valori medi del SOC utilizzati per il test di invecchiamento [39].	63
Tabella 18	Specifiche convertitore buck utilizzato nella simulazione.	83
Tabella 19	Riepilogo parametri stimati con ZView®.	89
Tabella 20	Specifiche nominali della ICR18650-26J M [55].	95
Tabella 21	Risultati ottenuti dalle prove di scarica per la caratterizzazione della cella ICR18650-26JM.	118



## ASPETTI FONDAMENTALI DEI VEICOLI ELETTRICI

---

*An electric vehicle is a vehicle that is driven by an electric motor which draws its current either from storage batteries or from overhead cables.* Questa è la definizione di veicolo elettrico estrapolata dal Dizionario Collins, che tradotta significa: "Un veicolo elettrico è un veicolo azionato da un motore elettrico che assorbe la sua corrente da accumulatori o cavi aerei". Tuttavia questa definizione in ambito automotive è troppo generica perché esistono varie tipologie di veicolo elettrici, *Full electric* o *Hybrid*, di conseguenza è necessario fare una distinzione tra le varie architetture di alimentazione.

- **Mild Hybrid:** definiti anche come *Ibridi leggeri* nei quali un piccolo motore elettrico (con una potenza di qualche cv) viene affiancato all'alternatore. Questo ulteriore motore aiuta nelle fasi più critiche per un motore ICE (*Internal Combustion Engine*) come durante l'accelerazione, comportando una leggera diminuzione dei consumi globali di carburante. La batteria in genere ha una capacità inferiore al kWh, con una tensione di 12 V o 48 V e si carica solamente durante le fasi di frenata visto che, non essendoci un caricatore, il flusso di energia non può fluire dal motore alla batteria.
- **Full Hybrid:** a differenza della categoria precedente in questo caso il motore elettrico ha una potenza maggiore ed è contenuto nella scatola del cambio. Non interviene solo nella fase di accelerazione, ma è in grado di muovere in maniera autonoma il veicolo senza l'intervento del motore ICE. Il numero di km percorribili in modalità completamente elettrica dipende dalla grandezza dell'accumulatore, in genere non si superano i 10 km di autonomia. Come nel caso precedente, anche i Full Hybrid si ricaricano durante le fasi di rallentamento attraverso la *Frenata Rigenerativa* dove, alla forza frenante generata dai freni, si affianca il motore elettrico, che trascinato dalle ruote funziona da generatore.
- **Hybrid Plug-In (PHEV):** strutturalmente molto simili ai Full Hybrid, con la differenza di disporre di un accumulatore più capiente che permette una percorrenza in elettrico di decine di km. La ricarica avviene con le modalità viste in precedenza, alle quali si aggiunge la possibilità di essere ricaricato dalla rete elettrica grazie alla presenza di un connettore; da qui la sigla *Plug-In*.

- **Full Electric (EV o BEV):** da come dice il nome in questa tipologia di veicoli non è presente un motore ICE ma la trazione viene fornita completamente da un motore elettrico. La capacità degli accumulatori è tale da permettere un'autonomia di centinaia di km. La ricarica degli accumulatori avviene per la maggiore utilizzando la rete elettrica e in minima parte attraverso la frenata rigenerativa.

### 1.1 NORME TECNICHE

La standardizzazione delle normative e degli standard tra i vari Paesi è uno dei passaggi fondamentali da attuare se si vuole avere una massiccia diffusione dei veicoli elettrici. Questo permette di garantire l'interoperabilità dei sistemi di ricarica anche in Paesi dove le caratteristiche della rete elettrica sono differenti.

Lo IEC, *International Electrotechnical Commission*, ha il compito di preparare le norme tecniche che devono essere adottate da tutti i costruttori di automobili e dai produttori delle infrastrutture collegate alla mobilità elettrica. L'Italia, facendo parte della Comunità Economica Europea, aderisce al CENELEC, *Comité européen de normalisation en électronique et en électrotechnique*, che ha il compito di far adottare le norme IEC e nel caso proporre delle modifiche comuni.

Le norme tecniche riguardanti i veicoli elettrici si dividono in funzione dell'ambito di applicazione, in particolare:

- **IEC 61851** "*Sistemi di ricarica conduttivi per veicoli elettrici*", norma che a sua volta si divide in 5 parti. La prima è dedicata ai requisiti generali, a cui seguono i requisiti di emissione elettromagnetica per sistemi di ricarica in AC e DC, le stazioni di ricarica in DC e infine i sistemi di comunicazione digitale tra veicolo e stazione.
- **IEC 62196** "*Spine, prese, connettori per veicoli e prese per veicoli*", come la precedente anche questa si divide in 3 parti. Nella prima parte sono contenuti i requisiti generali, nella seconda è descritta la compatibilità dimensionale e i requisiti di intercambiabilità per accessori da collegarsi al connettore di ricarica in AC, mentre l'ultima descrive gli stessi argomenti della precedente aggiungendo però il modo di ricarica in DC.
- **IEC 62893** "*Cavi di ricarica per veicoli elettrici per tensioni nominali fino a 0,6/1 kV inclusi*".
- **IEC 60364** "*Installazioni elettriche a bassa tensione*", contenente le norme tecniche da rispettare nell'installazione di colonnine di ricarica (wallbox) domestiche.

Tuttavia lo standard IEC 61851, utilizzato in Europa e in Cina, deriva dallo SAE J1722 sviluppato negli Stati Uniti. La differenza tra i

due è superficiale tanto che la terminologia utilizzata è la stessa, dove la SAE s'interessa di "metodi" e "livelli di potenza", lo IEC parla solamente di "modi", ma il significato rimane il medesimo. Per esempio, il livello 1 della SAE J1722 e il modo 1 dello IEC 61851 relativo alla ricarica domestica presentano le stesse caratteristiche.

## 1.2 STAZIONI DI RICARICA

Una stazione di ricarica per veicoli elettrici, chiamata anche EVSE ("*Electric Vehicle Charging Station*"), è un elemento fondamentale nell'architettura della mobilità elettrica. Essa ha il compito di ricaricare la batteria dell'autoveicolo, sia esso sia un plug-in o un full electric. Le stazioni di ricarica si suddividono in:

- **residenziali/Domestiche:** sono colonnine installate in luoghi privati come garage o parcheggi residenziali. Non è presente un metodo di autenticazione e sono collegate alla rete di alimentazione attraverso un circuito dedicato dotato di differenziale aggiuntivo. La potenza erogabile dipende dal tipo di contratto firmato con il fornitore della rete elettrica. Spesso la potenza massima è di 3.3 kW in monofase. In alcuni casi, un utente privato con particolari necessità, può chiedere un aumento di potenza anche fino a 10 kW in monofase;
- **pubbliche:** sono colonnine installate in luoghi pubblici, come un parcheggio di un centro commerciale e utilizzabili da tutti i visitatori dopo essersi autenticati o nella colonnina stessa o attraverso piattaforme web. La potenza erogabile arriva in genere a 22 kW in trifase;
- **fast e ultra fast:** stazioni di ricarica veloce in corrente continua, sono installate in luoghi trafficanti in modo tale da essere facilmente raggiungibili. Un'omogenea e capillare presenza è di fondamentale importanza per una diffusione dei veicoli elettrici in tutto il territorio, in quanto, permettono la ricarica ad elevate potenze, anche superiori ai 300 kW. Questo riduce il tempo di fermata necessario al rifornimento. I metodi di autenticazione sono gli stessi delle colonnine pubbliche; tuttavia esistono delle reti di ricarica proprietarie, come i Supercharger per Tesla, nei quali l'autenticazione e il pagamento avviene in modo automatico collegando il connettore di ricarica;
- **battery swap:** in questo caso non ci si riferisce propriamente ad una stazione di ricarica, bensì ad un luogo dove le batterie scariche vengono sostituite con altre di nuove e cariche. È una soluzione usata nelle flotte di veicoli uguali tra loro o per i motocicli di piccola taglia, dove la rimozione della batteria è

facilmente praticabile. Malgrado ciò, questa tecnica per i veicoli privati risulta attualmente di difficile implementazione.

### 1.3 TIPI E MODI DI RICARICA

La connessione tra il sistema di ricarica e il veicolo da ricaricare può avvenire con 3 diversi tipi di connessione, associati a 4 differenti modi di ricarica, per un totale di 12 possibili configurazioni. Ciononostante, le tipologie di connessione utilizzate sono state standardizzate negli anni per facilitare la diffusione dei veicoli elettrici.

#### *Tipi di connessione*

Per tipo di connessione si intende la modalità con la quale un veicolo elettrico si collega alla stazione di ricarica, ossia in funzione del lato o dei lati dotati di connessione non fissa. I tipi sono 3 e sono descritti nella IEC 61851-1.

1. Il veicolo elettrico è connesso al punto di ricarica utilizzando un cavo di alimentazione e una spina permanentemente fissati al veicolo. In questa categoria rientrano in genere i *light vehicle*, cioè i veicoli leggeri, come scooter, micro-car o anche monopattini elettrici.

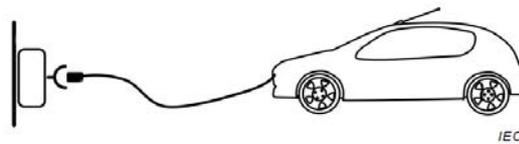


Figura 1: Tipo A [1].

2. Il veicolo elettrico è connesso al punto di ricarica utilizzando un cavo di alimentazione rimovibile provvisto di connettore mobile e spina per il collegamento alla presa di alimentazione in AC. A questa tipologia appartengono le autovetture elettriche che si caricano in AC da stazioni di ricarica domestiche e pubbliche.

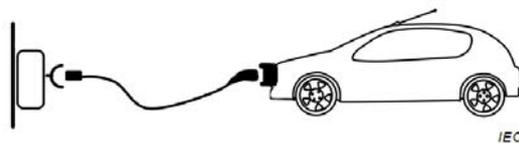


Figura 2: Tipo B [1].

3. Il veicolo è connesso al punto di ricarica utilizzando un cavo di alimentazione e un connettore mobile permanentemente fissati all'apparecchio di alimentazione. Questo tipo di connessione si trova nelle colonnine di ricarica in corrente continua, che

per le elevate potenze in gioco, richiedono un raffreddamento a liquido del cavo di ricarica.

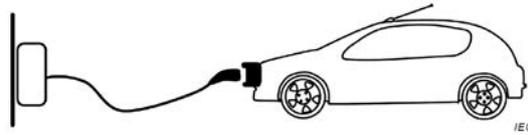


Figura 3: Tipo C [1].

### *Modi di ricarica*

Complessivamente i modi di ricarica definiti nella IEC 61851-1 sono 4. Essi si differenziano in funzione del regime AC/DC, dalla corrente massima, dal tipo di connettore e dall'ambiente in cui viene effettuata la ricarica.

- **Modo 1:** definito spesso come la ricarica domestica, si riferisce al collegamento del veicolo direttamente alla rete di alimentazione utilizzando prese e spine normate fino a 16 A e 250 V in monofase e 16 A e 480 V in trifase, senza l'utilizzo di un Control Box. Il difetto principale risiede in potenziali problemi di sicurezza; infatti il corretto funzionamento dipende dalla presenza, lato impianto, di adeguate protezioni contro le sovracorrenti e i contatti accidentali. Per questo motivo le norme tecniche richiedono la presenza di interruttori differenziali per la protezione contro le dispersioni. Questa modalità di ricarica viene per la maggior parte utilizzata per la e-Bike o simili in ambienti privati dato il basso costo di installazione. Può essere paragonata ai sistemi di preriscaldamento dei motori comunemente utilizzati nei Paesi del Nord Europa per evitare la solidificazione dell'olio motore. Per i veicoli elettrici, questo Modo è vietato in molti paesi dell'Unione Europea, compresa l'Italia. [2]
- **Modo 2:** viene considerato come una stazione di ricarica in corrente alternata portatile a spina. Prevede, come il Modo 1, il collegamento del veicolo elettrico alla rete di alimentazione attraverso prese e spine conformi alla standard IEC, ma con una corrente nominale fino a 32 A e 250 V in monofase e 32 A e 480 V in trifase. Nel cavo di alimentazione, ad una distanza massima di 30 cm dalla spina, è integrato un apparecchio denominato *In-Cable Control and Protection Device* che, oltre al compito di controllare il processo di carica, contiene un differenziale da 30 mA. Inizialmente il Modo 2 era stato pensato per gli Stati Uniti come una soluzione transitoria; tuttavia in Europa questo metodo ha sostituito il Modo 1 per la carica presso punti non dedicati. Prevede una potenza massima che può arrivare fino a 15 kW

quando si usa un apparecchio dotato di spina industriale e a circa 8 kW quando si usa una alimentazione monofase. Lo svantaggio principale del Modo 2 è che il box di controllo protegge il cavo a valle del veicolo ma non la spina stessa e in Italia è vietato nei luoghi pubblici. [2]

- **Modo 3:** consiste nel collegamento del veicolo a prese di corrente o connettori in AC specifici per la ricarica dei veicoli elettrici. Si tratta in sostanza delle stazioni di ricarica fisse in corrente alternata, colonnine o Wall Box. Secondo la norma internazionale IEC 61851-1 deve esserci un contatto pilota di controllo tra il sistema di alimentazione e il veicolo elettrico che abbia il compito di controllare l'inserimento dei connettori, la continuità del conduttore di protezione e la funzione di controllo attiva. La potenza massima erogabile non viene definita nella IEC 61851-1 e il veicolo non distingue tra ricarica in Modo 2 e Modo 3. [2]
- **Modo 4:** si collega il veicolo a colonnine di ricarica in corrente continua attraverso dei connettori specifici. Queste stazioni incorporano oltre alle funzioni di controllo e di protezione il caricabatteria che raddrizza e regola la corrente di ricarica che viene direttamente erogata alla batteria del veicolo. Il Modo 4 è spesso associato alla ricarica rapida che raggiunge su alcuni veicoli una potenza di 350 kW. In questo Modo rientrano anche i sistemi di connessione automatica (pantografi) in corrente continua usati per la ricarica veloce dei bus sino a 600 kW. Come nel Modo precedente, nel testo della normativa non viene specificata una potenza massima. [2]

Le varie modalità sono riassunte in tab. 1.

<b>Modo 1</b>	<b>Modo 2</b>
16 A 250 V monofase/16 A 480 V trifase	32 A 250 V monofase/32 A 480 V trifase
Corrente alternata	Corrente alternata
Ambiente domestico	Ambiente domestico
Ricarica lenta	Ricarica lenta
Tipo A	Tipo A/B
<b>Modo 3</b>	<b>Modo 4</b>
<i>non specificato</i>	<i>non specificato</i>
Corrente alternata	Corrente continua
Ambiente pubblico	Ambiente pubblico
semi-fast	fast
Tipo B	Tipo C

Tabella 1: Comparazione tra i modi di ricarica [3].

In funzione del modo di ricarica si sceglie il tipo di caricatore necessario. Essi si distinguono in due categorie: gli *on-board* e gli *off-board charger*, cioè caricatori che possono essere interni o esterni all'autoveicolo. In generale un caricatore on-board è studiato per piccole potenze, mentre un off-board è progettato per la ricarica ad elevate potenze e necessita che il veicolo presenti un BMS (*Battery Management System*) più sofisticato. Il vantaggio principale nell'utilizzo di un caricatore off-board è la diminuzione del peso che comporta una maggiore efficienza e quindi una maggiore autonomia. Tuttavia, tutte le autovetture elettriche in commercio hanno sempre un caricatore on-board per la ricarica lenta e un BMS sofisticato per permettere la ricarica veloce a potenze elevate. In tab. 2 è indicata una comparazione tra i due tipi di caricatore.

On-Board Battery Charger	Off-Board Battery Charger
Bassa potenza di ricarica ~20 kW	Elevata potenza di ricarica ~350 kW
BMS controllato dal raddrizzatore di bordo	BMS complesso
Basso riscaldamento della batteria	Elevato riscaldamento della batteria
Aggiunta di peso al veicolo	Rimozione di peso dal veicolo
Modo 1, 2 e 3 di ricarica	Modo 4 di ricarica
Ricarica lenta o semi-fast	Ricarica fast

Tabella 2: Comparazione tra On-Board e Off-Board Charger [4]

#### 1.4 CONNETTORI

Come introdotto nella sezione 1.1, la normativa a cui fanno riferimento i connettori di ricarica, lato veicolo o lato colonnina e tutti gli accessori utilizzati durante la ricarica, sono contenute nella IEC 62196. In particolare questa normativa impone un limite alla tensione massima in funzione del regime di alimentazione:

- 690 V AC da 50 a 60 Hz con una corrente nominale non superiore a 250 A;
- 1500 V DC con una corrente nominale non superiore a 400 A.

Attualmente tutte le stazioni di ricarica hanno delle potenze massime che rientrano nella normativa. Nonostante ciò, il veloce diffondersi di veicoli elettrici porta una spinta al miglioramento delle tecnologie e quindi non è da escludersi un eventuale aggiornamento della normativa che alzerà i valori massimi di corrente al fine di aumentare la potenza di ricarica normata.

Nella IEC 62196 sono normati 4 differenti tipi d'interfacce con il veicolo:

1. un'interfaccia universale per tutti i modi di ricarica che prevede:

- Elevata potenza in AC e 32 A in AC;
  - Elevata potenza in DC e 32 A in AC
2. un'interfaccia di base per i modi 1, 2 e 3 solo per la ricarica;
  3. un'interfaccia per la ricarica in corrente continua DC;
  4. un'interfaccia definita "combinata" che permette di utilizzare lo stesso connettore per la ricarica in AC e DC.

I tipi di configurazioni utilizzati per la ricarica dei veicoli elettrici sono: l'interfaccia base, DC e la combinata. L'interfaccia universale non trova nessuna applicazione nel campo della mobilità elettrica, per questo motivo non verrà analizzata.

Ad ognuna delle precedenti interfacce viene associata una tipologia di presa lato veicolo e lato colonnina.

- universale, elevata potenza in AC;
- universale, elevata potenza in DC;
- basiche;
- in corrente continua DC;
- connettori combinati.

I livelli di potenza massima non sono specificati per ogni singola interfaccia ma vengono fissati in funzione delle caratteristiche della presa utilizzata. Infatti la normativa riporta per ogni singola interfaccia la massima potenza ammissibile anche se, l'effettiva potenza erogabile dal connettore, è minore. [5]

#### 1.4.1 Connettori basici

I connettori basici rappresentano la categoria più utilizzata per la carica dei veicoli elettrici in corrente alternata. Vengono differenziati in funzione della corrente, della tensione nominale e del numero delle fasi. È inoltre presente un sistema di blocco che permette agli utilizzatori di ricevere un feedback se il connettore è inserito correttamente. Essi si dividono in tre tipologie e sono normati dalla IEC 62196-2.

##### *Connettore Tipo 1*

*Valori massimi [6]: 250 V, 32 A monofase*

È un connettore utilizzato solo lato veicolo, deriva dalla spina SAE J1772-2009 (Yazaki) che rappresenta lo standard in Nord America e in Giappone. In Europa questo standard non è molto diffuso dato che la potenza di ricarica deve essere inferiore ad 8 kW. Il connettore

dispone di cinque contatti come riporta il layout fig. 4, due pin per l'alimentazione monofase (L1 e L2/N), uno per il sensore di prossimità (CS), un'altro per le funzioni di controllo (CP Control Pilot) e l'ultimo necessario per la connessione a terra (PE). [7]

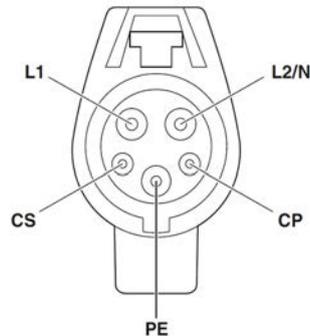


Figura 4: Connettore Tipo 1 [8].

#### Connettore Tipo 2

Valori massimi [6]:

250 V con: 13 A, 20 A, 32 A, 63 A, 70 A monofase

480 V con: 13 A, 20 A, 32 A, 63 A trifase

Il connettore di tipo 2 (o connettore Mennekes) deriva da una prima serie di prese sviluppate negli anni 90 da una azienda tedesca di nome *Mennekes* a cui sono stati aggiunti dei contatti di controllo e a partire da questi, sviluppato il connettore presente nella normativa.

L'Associazione dei Costruttori Europei di Automobili (ACEA) nel 2011 ha deciso di adottare, entro il 2017, il Tipo 2 come presa standard di ricarica in tutti i veicoli commercializzati in Europa. Questa scelta è stata dettata dall'obiettivo di garantire un'interoperabilità delle varie stazioni di ricarica distribuite nel territorio. Questa scelta è dovuta all'elevata flessibilità di questo tipo di connettore, in quanto permette di ricaricare con una potenza che varia tra i pochi kW in monofase fino a 43.5 kW in trifase, valore adatto per la ricarica rapida in AC. Nello sviluppo di questa presa i fattori ergonomici sono stati presi in considerazione visto che, i connettori di Tipo 1, si erano rilevati troppo larghi e non favorivano una corretta impugnatura. Tuttavia essi inizialmente non disponevano del sistema di blocco. Infatti il corretto inserimento veniva visualizzato con l'accensione di un led lato veicolo e solo nel 2012 è stato inserito il sistema di bloccaggio.

Questo connettore risulta essere la tipologia più diffusa per la ricarica in AC, sia in luoghi pubblici come le colonnine, sia a livello domestico con le Wall-Box. Il numero di contatti a disposizione sono complessivamente sette: cinque dedicati all'alimentazione e due al controllo. Per ottenere il pinout della Tipo 2 si è partiti da quel-

lo della Tipo 1, a cui sono stati aggiunti la terza fase e il neutro per consentire la ricarica da una sorgente trifase. [7]

In fig. 5 è riportato il pinout del connettore.

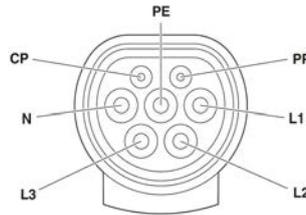


Figura 5: Connettore Tipo 2 [8].

Una particolare variante del Tipo 2 è rappresentata dal connettore utilizzato dall'azienda californiana di autovetture elettriche Tesla che, pur mantenendo le stesse specifiche e la compatibilità con tutti gli accessori per il Tipo 2, permette la ricarica da una sorgente in corrente continua. Tale peculiarità è resa possibile utilizzando i pin L2 e L3 come fase positiva e negativa. Questo connettore consente una potenza di ricarica in CC fino a 220 kW nelle stazioni di ricarica proprietarie del brand californiano, i *supercharger*. Tuttavia, dovendosi uniformare alle direttive UE, i nuovi modelli presentano una presa Tipo 2 standard.

### Connettore Tipo 3

Valori massimi [6]:

*Tipo 3A/3C: 250 V con 16 A o 32 A monofase,*  
*Tipo 3C: 480 V con 32 A o 63 A trifase*

Questa tipologia è stata immessa nel mercato dalla *EV Plug Alliance* nel 2010. Essa deriva dal connettore sviluppato da Scame, un'azienda italiana di dispositivi elettrici. Era stata proposta con l'obiettivo di diventare lo standard a livello Europeo e aveva trovato un'elevata diffusione in Francia. Tuttavia la scelta fatta da ACEA nel 2011 ha sancito la fine della diffusione di questo connettore, rimane utilizzato solo nei light vehicles.

Esistono due tipologie di connettore, il Tipo 3A e il Tipo 3C. Il primo è dedicato alla ricarica dei veicoli elettrici leggeri (scooter elettrici o simili). Lo si trova sia nelle stazioni di ricarica, sia nei veicoli elettrici dal momento che molto spesso è una terminazione del cavo di ricarica integrato. Le specifiche indicano una tensione massima di 230 V e 16 A, minori dei valori massimi imposti dalla normativa. Il tipo 3C può erogare al massimo una potenza di 22 kW e presenta lo stesso protocollo di comunicazione della Tipo 2.

Il connettore Tipo 3A è provvisto di quattro contatti: tre di potenza (L1, N; PE) e uno di comunicazione (CP), mentre il Tipo 3C presenta gli stessi contatti del Tipo 2. In fig. 6 sono riportate le due tipologie di Tipo 3. [7]

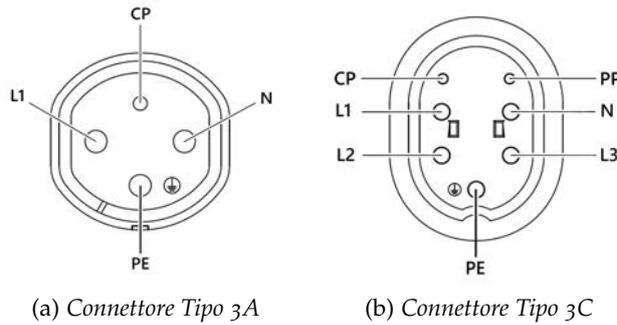


Figura 6: Connettore Tipo 3 [8].

#### 1.4.2 Connettori in corrente continua

Sono dei connettori sviluppati per poter ricaricare un autoveicolo in corrente continua. All'interno di quest'interfaccia si trovano la *Configurazione AA* conosciuta con il nome *CHAdeMO* e la *Configurazione BB*, come in precedenza si fa sempre riferimento alla normativa IEC 62196-2. [6]

##### *Connettore CHAdeMO*

*Valori massimi [9]: 1000 V, 400 A DC*

La configurazione AA è nota commercialmente con il nome CHAdeMO, acronimo di *Charge de Move* traducibile in "ricarica per muoverti". È stata introdotta nel mercato nel 2009 dalla CHAdeMO Association, un gruppo di aziende automobilistiche giapponesi, ma soltanto nel 2014 è stata inclusa nella IEC 61851-23 come sistema di ricarica. Inizialmente la potenza di ricarica era di 62.5 kW (500 V e 125 A) e ha raggiunto i 100 kW nel 2016 con uno step evolutivo per arrivare agli attuali 400 kW attraverso l'adozione di un nuovo standard. Il connettore CHAdeMO risulta il più diffuso in Giappone per la ricarica rapida in corrente continua mentre in Europa questo standard è utilizzato dalle sole autovetture coreane, giapponesi e francesi. Il problema principale, che ne ha impedito la diffusione, è dovuto al fatto che esso nasce solo per la ricarica in corrente continua e di conseguenza è necessario avere, lato veicolo, un'ulteriore presa per la ricarica in corrente alternata.

Utilizzando questo connettore la comunicazione tra veicolo e stazione di ricarica non avviene più utilizzando i pin CP e PP ma attraverso il protocollo *CAN-bus*. Il pinout del connettore è riportato in fig. 7.

##### *Configurazione BB*

*Valori massimi [9]: 950 V, 250 A DC*

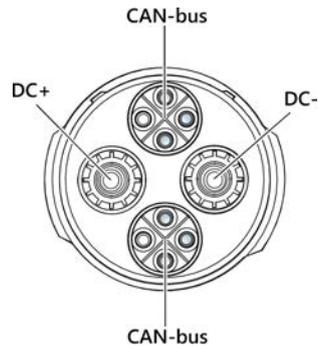


Figura 7: Connettore CHAdeMO [8].

Questa tipologia di connettore per la ricarica in corrente continua è stata sviluppata ed è usata solamente in Cina. In Europa non si può trovare né sulle autovetture, né nelle stazioni di ricarica. Le soluzioni tecniche adottate da questa presa sono contenute nello standard GB/T 20234.3 e, come il connettore CHAdeMO, utilizza per la comunicazione il protocollo CAN-bus. Nella presa sono presenti nove pin: due di potenza (DC+ e DC-), la messa a terra (PE) e i restanti sono utilizzati per la comunicazione.

Il pinout del connettore è riportato in fig. 8.

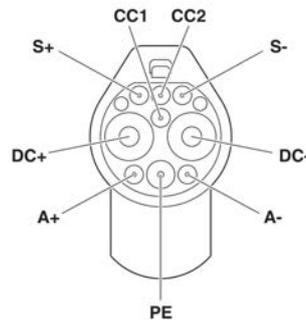


Figura 8: Configurazione BB [8].

#### 1.4.3 Connettore combinati

Questa tipologia di connettori permette la ricarica in corrente alternata e in corrente continua utilizzando la medesima presa. Tale configurazione nasce dalla necessità di ridurre il più possibile lo spazio occupato dalle prese nell'autoveicolo. Infatti le configurazioni AA e BB, pur permettendo la ricarica in corrente continua, devono essere affiancate da un'ulteriore presa con un conseguente aumento del costo per il numero maggiore di componenti.

In base alla normativa, i connettori combinati si suddividono in quattro configurazioni: CC, DD, EE e FF. Tuttavia le prime due sono riservate ad eventuali usi futuri e le specifiche tecniche che dovranno avere non sono ancora state pubblicate. Commercialmente la configu-

razione EE prende il nome di *Combined Charging System (CCS) Combo 1*, mentre la FF di *CCS Combo 2*.

#### *CCS Combo 1*

*Valori massimi [9]: 1000 V, 400 A DC*

Questo connettore combinato deriva dal Tipo 1 utilizzato in America al quale sono stati aggiunti due ulteriori contatti per mettere la ricarica in corrente continua ed eliminati quelli per la ricarica in alternata, dato che il protocollo di comunicazione utilizzato rimane lo stesso. I contatti utilizzati per lo scambio di informazioni tra stazione e veicolo sono rimasti inalterati: la massima potenza di ricarica consentita è 350 kW. Non essendo che il connettore di Tipo 1 è diffuso in Europa neppure questa sua variante ha trovato diffusione e pertanto viene utilizzato principalmente nel mercato degli Stati Uniti e in Giappone.

Il pinout del connettore è riportato in fig. 9.

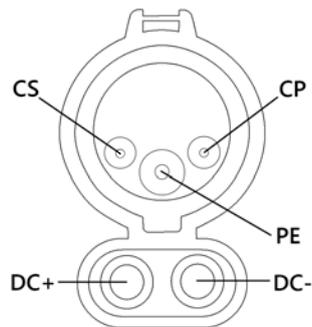


Figura 9: CCS Combo 1 [8]

#### *CCS Combo 2*

*Valori massimi [9]: 1000 V, 400 A DC*

Questa tipologia di connettore deriva dalla Tipo 2 e rappresenta la configurazione più utilizzata in Europa per la ricarica in corrente continua fino ad una potenza di 350 kW. Dal 2014 l'ACEA ha stabilito che questa configurazione deve essere lo standard per la ricarica in DC. Attualmente tutti i veicoli di nuova progettazione dispongono di questo connettore che, pur presentando una struttura compatta, permette la ricarica sia in corrente alternata sia in continua.

Il CCS Combo 2 possiede una distribuzione dei contatti molto simile a quella del Tipo 2; i pin di potenza per la ricarica in AC sono stati sostituiti nella parte inferiore da quelli in DC, mentre la parte di comunicazione è rimasta invariata. Il pinout del connettore è riportato in fig. 10.

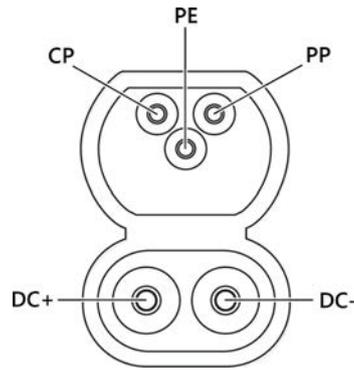


Figura 10: CCS Combo 2 [8]

### Modi di ricarica e connettori

Ad ogni tipologia di connettore viene associato da normativa un modo di ricarica come riportato in tab.3. Si nota che al modo di ricarica 1 non è associato nessun connettore; questo si spiega perché esso non assicura un grado di sicurezza tale da poter essere installato in ambienti pubblici e privati.

Connettore	Modo	Ambiente	Potenza MAX	Velocità
Tipo 1	Modo 3	Domestico/Pubblico	8 kW	slow
Tipo 2	Modo 3	Domestico/Pubblico	43.5 kW	semi-fast
Tipo 3A	Modo 2	Domestico	8 kW	slow
Tipo 3C	Modo 3	Domestico/Pubblico	22 kW	semi-fast
CHAdeMO	Modo 4	Pubblico	400 kW	fast
Conf. BB	Modo 4	Pubblico	120 kW	fast
CCS Combo 1	Modo 4	Pubblico	350 kW	fast
CCS Combo 2	Modo 4	Pubblico	350 kW	fast

Tabella 3: Modi di ricarica e connettori

## 1.5 IL MERCATO DELL'ELETTRICO OGGI

Al fine di identificare nel modo migliore le caratteristiche dei veicoli elettrici attualmente in vendita, si è analizzata la classifica delle vetture più vendute in Italia nell'anno 2019, alle quali sono stato aggiunte anche l'Audi e-tron e la Porsche Taycan, nonostante non siano state vendute per tutto il 2019.

In tab. 4 sono riportati il modello del veicolo, la capacità della batteria, la potenza di ricarica in regime monofase, trifase e in corrente continua (se permesso) e la tensione nominale della batteria. Si può osservare come le capacità della batteria siano molto differenti al variare del modello. Questo è dovuto per un motivo di spazio in

quanto, se il veicolo è più grande, permette l'alloggiamento di un accumulatore altrettanto grande.

La maggior parte dei veicoli in vendita presenta come connettore quello imposto dall'UE (Tipo 2 e CCS 2). Tuttavia per i veicoli in vendita prima del 2017 questo non vale, come nel caso della Tesla Model S e X presentano un connettore proprietario del tutto simile ad un Tipo 2.

Considerevoli differenze si notano anche dal punto di vista della potenza di ricarica. Sono pochi i modelli che permettono di caricare a 22 kW in trifase. Questo è dovuto al fatto che un caricatore con questa potenza è in genere ingombrante e pesante e si preferisce quindi puntare nella ricarica rapida da colonnine in DC. La tensione della batteria è molto variabile e di conseguenza le stazioni rapide dovranno adattare la loro tensione in uscita in base all'architettura della batteria. Si noti come la Porsche Taycan presenti una tensione nominale di 800 V. Questo permette di incrementare la potenza di ricarica (270 kW), dato che a parità di potenza la corrente che circola nei cavi è la metà rispetto a quella degli altri modelli. Ed essendo la potenza dissipata proporzionale con il quadrato della corrente questo permette di innalzare la potenza pur mantenendo un'efficienza del processo di ricarica elevata.

Modello	Batteria kWh	Connettore AC / DC	Potenza caricatore mono/trifase/DC (kW)	Batteria (V)
Audi e-tron	95	Tipo 2 / CCS 2	7.4 / 22 / 150	396
BMW i3	33	Tipo 2 / CCS 2	7.4 / 11 / 50	360
Hynudai Kona	64	Tipo 2 / CCS 2	7.4 / 11 / 70	352
Jaguar i-Pace	90	Tipo 2 / CCS 2	7.4 / 11 / 100	390
Nissal Leaf	62	Tipo 2/CHAdEMO	6.6 / 11 / 50	360
Porsche Taycan	93	Tipo 2 / CCS 2	7.4 / 22 / 270	800
Renault Zoe	58	Tipo 2 / CCS 2	7.4 / 22 / 50	400
Smart Fortwo	17.6	Tipo 2 / -	7.4 / 22 / -	344
Tesla Model 3	75	Tipo 2 / CCS 2	7.4 / 11 / 250	350
Tesla Model S	100	Proprietario	5.5 / 16.5 / 220	400
Tesla Model X	100	Proprietario	5.5 / 16.5 / 220	400

Tabella 4: Caratteristiche vetture elettriche più vendute in Italia nel 2019.

Altro parametro importante nella scelta di un veicolo elettrico è la velocità di ricarica. Spesso il tempo espresso in ore viene calcolato erroneamente, come la capacità della batteria diviso la potenza del caricatore. Questa espressione vale quando la potenza di ricarica si mantiene costante nel tempo e avviene nel momento in cui la ricarica viene effettuata da sorgenti in corrente alternata. Quando questa avviene in corrente continua su colonnine super o ultra fast si perde la relazione lineare tra la potenza del caricatore e il tempo per la ricarica.

Da queste sorgenti la potenza erogata non è più costante e dipende da fattori come la percentuale residua, la temperatura e lo stato di salute della batteria. Da tale effetto non è più possibile calcolare il tempo di ricarica in modo facile e diretto, ma si devono utilizzare opportuni algoritmi che stimino il tempo di ricarica in funzione dei parametri della batteria.

## 1.6 PROTOCOLLI DI COMUNICAZIONE

Nei veicoli ibridi plug-in o in quelli full electric l'interazione con le strutture esterne è un punto cruciale. Una facile ed efficiente comunicazione porta ad una migliore gestione del livello di carica della batteria, dei servizi o della supervisione da remoto. È tuttavia utile anche in previsione futura quando tutti gli oggetti saranno connessi: questo è ciò che si definisce mondo dell'IoT.

L'interfaccia di comunicazione ricopre un'elevata importanza anche nei sistemi di ricarica. Il veicolo ha la necessità di stabilire una comunicazione con la stazione di ricarica per identificare i parametri con cui deve avvenire il trasferimento di potenza. Questi aspetti sono descritti in modo completo dall'insieme delle parti della direttiva IEC 61851, la comunicazione digitale è opzionale dei Modi 1, 2 e 3 ma nel Modo 4 è obbligatoria ed è descritta nella IEC 61851-24.

### *PWM CP*

Anche se non obbligatorio nel Modo 3, lo scambio di informazioni tra i componenti del sistema di ricarica è molto utile. Esistono vari protocolli di comunicazione nel settore automotive che sfruttano un solo conduttore tra i quali la *Local Internet Network (LIN) Communication* oppure la *Pulse with Modulation (PWM), CP* che rappresenta lo standard nella IEC 61851.

Questo protocollo utilizza il pin CP presente in tutti i connettori utilizzati nel Modo 3 e attraverso esso è possibile:

- verificare che il veicolo sia correttamente collegato;
- verificare la continuità della protezione a terra;
- decidere se alimentare o meno il sistema di ricarica;
- selezionare la potenza di ricarica.

Il trasferimento di informazione attraverso il CP avviene utilizzando un segnale pilota basato su una PWM a 1 kHz con ampiezza di  $\pm 12$  V e analizzando il duty cycle del segnale la stazione di ricarica identificherà i limiti del veicolo.

La relazione tra il duty cycle e la corrente è definita attraverso due equazioni che dipendono dal range della corrente: [10]

$$\begin{aligned} \text{DutyCycle} &= \frac{\text{Amp}}{0.6} \quad \text{se } 6 \leq \text{Amp} \leq 51 \\ \text{DutyCycle} &= \left( \frac{\text{Amp}}{2.5} \right) + 64 \quad \text{se } 51 < \text{Amp} \leq 80 \end{aligned} \quad (1)$$

dove Amp rappresenta la corrente di ricarica.

Rappresentando le equazioni contenute in (1), si ottiene la fig. 11, si osserva che per valori del duty cycle inferiore al 10% non vi è associata nessuna corrente in quanto l'intervallo che va dallo 0% al 10% viene utilizzato per verificare i dispositivi collegati, mentre per valori superiori al 97% la ricarica non viene eseguita.

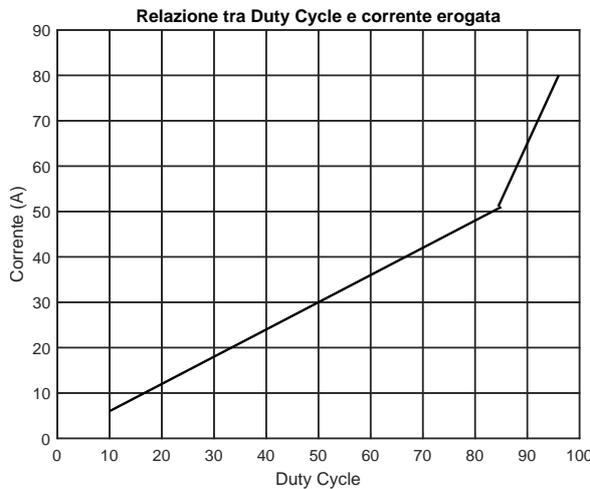


Figura 11: Segnale PWM [10].

Una volta collegato il connettore, la stazione di ricarica invia un'ondata quadra di ampiezza 24 V al pin CP, collegato alla messa a terra chiudendo così il circuito. Il veicolo richiede lo stato di carica impostando una certa resistenza tra i pin CP e PP, la stazione analizza di conseguenza la tensione e regola la potenza da erogare.

In tab. 5 è riportata la descrizione degli stati di ricarica.

I passaggi eseguiti dal veicolo e dalla colonnina quando vengono collegati sono: [10]

1. la stazione di ricarica imposta una tensione di 10 V nel CP, questa trasmissione segnala al veicolo che il connettore è stato connesso;
2. quando la spina viene inserita, il veicolo imposta una resistenza di 2.7 kΩ nel CP che porta ad avere una tensione di 9 V al posto di 12 V;
3. la stazione di ricarica si muove verso lo stato B dove abilita la PWM: questo segnala quanta corrente il veicolo può ricevere;

Stato	Tensione High	Tensione Low	Frequenza	Descrizione
Stato A	12 V	N.D.	DC	Veicolo non connesso
Stato B	9 V	-12 V	1 kHz	Veicolo connesso
Stato C	6 V	-12 V	1 kHz	Veicolo in carica
Stato D	3 V	-12 V	1 kHz	Veicolo in carica, richiesta ventilazione
Stato E	0 V	0 V	N.D.	Errore
Stato F	+-	-12 V	N.D.	Veicolo connesso, stazione non disponibile per la ricarica

Tabella 5: Stati di carica richiesti [1].

4. comincia il trasferimento di potenza e la resistenza viene impostata a  $822 \Omega$  a cui corrisponde una tensione di 6 V, segnalando che il veicolo è in carica;
5. la ricarica termina quando il veicolo è completamente caricato o quando la batteria ha raggiunto una certa percentuale precedentemente impostata. Segue la disconnessione del connettore e quindi il ritorno della tensione a 12 V, che viene rilevata dalla stazione di ricarica riportando lo stato ad A.

#### *Comunicazione nel Modo 4*

Le precedenti modalità di comunicazione utilizzate non valgono per il Modo 4 di ricarica. Le indicazioni su come essa deve avvenire sono descritte nella direttiva IEC 61851-24: "Comunicazione digitale tra Stazione di ricarica DC per veicoli elettrici e un veicolo elettrico per il controllo della ricarica". In questo standard sono descritte due modalità con cui avviene la comunicazione digitale:

- la prima, basata sulla comunicazione CAN e attuata usando opportuni circuiti, è descritta nella ISO 11898-1;
- la seconda, basata sul Homeplug Green PHY, cioè un insieme di standard che permettono il trasferimento di dati sugli stessi cavi utilizzati per l'alimentazione elettrica. In particolare il Homeplug Green PHY è stato sviluppato appositamente per l'utilizzo nelle smart grid e quindi nel mondo automotive.

A differenza del Modo 3, dove la comunicazione era opzionale, nel Modo 4 il trasferimento di informazione è necessario talmente tanto che, se non dovesse esserci, la ricarica non potrebbe venire effettuata. Ciò è dovuto al fatto che in questo modo di ricarica, il caricatore è off-board, quindi la stazione di ricarica ha la necessità di dialogare con il BMS del veicolo per conoscere parametri caratteristici, come la tensione della batteria e la massima corrente erogabile.

### *Sistema A*

Con sistema A si intende una particolare modalità di ricarica in corrente continua, nel quale la comunicazione è realizzata attraverso il protocollo CAN-bus. In questa tipologia rientra il connettore CHAdeMO, (fig. 7). Questo protocollo permette il raggiungimento di una velocità massima di 500 kbps.

### *Sistema B*

In questo sistema rientra il connettore in configurazione BB (fig. 8). Esso utilizza i pin A+, A-, S+ e S-, realizzando una comunicazione simile a quella CAN-bus. Come detto in precedenza, questa configurazione di connettore non viene utilizzata e la velocità massima raggiunta è 250 kbps.

### *Sistema C*

Questo sistema di comunicazione viene applicato alla configurazione EE e FF, cioè i connettori CCS Combo 1 e 2. Di conseguenza questo rappresenta il protocollo più utilizzato nelle ricariche in corrente continua. La sostanziale differenza con i precedenti riguarda il fatto che in questo caso la comunicazione avviene attraverso i protocolli *Power Line Communication*, utilizzando i connettori CP e CC. Questo sistema implementa le seguenti caratteristiche:

- maggiore sicurezza dal momento che è possibile eseguire il criptaggio dei dati;
- assegnazione automatica degli indirizzi identificativi dei dispositivi;
- comunicazione basata sullo standard IPv6;
- compressione XML dei dati;
- approccio client/server;
- possibilità di aggiungere servizi terzi come controllo remoto.

In questo sistema è possibile raggiungere una velocità di 500 Mbit/s ad una frequenza inferiore a 100 MHz e la comunicazione è simile ad altri standard 802.x. L'approccio IP-based permette a questo protocollo di poter essere applicato anche alle infrastrutture "smart grid" o "vehicle to grid" che in un prossimo futuro saranno il centro della mobilità elettrica. [11]

## 1.7 COMPONENTI DI UN SISTEMA DI RICARICA

L'infrastruttura di ricarica è, insieme al sistema di gestione della batteria, una delle sfide tecniche più complesse nella progettazione dei veicoli elettrici. Analizzando le tipologie di sistema di ricarica, come introdotto nel paragrafo 1.3, esistono due tipi di caricatore: gli on-board e gli off-board charger. I primi sono interni al veicolo e utilizzati per piccole potenze di ricarica, mentre gli altri hanno dimensioni più elevate e sono alloggiati nelle colonnine di ricarica. In un sistema di ricarica on-board tutti i convertitori di fig. 12 sono contenuti all'interno del veicolo, mentre in un off-board si trovano nella colonnina. Nel veicolo è contenuto un solo convertitore DC/DC che ha la funzione di adattare la tensione di rete con quella della batteria.

Le tipologie di convertitori utilizzati nei due caricatori sono le stesse, si differenziano nelle dimensioni visto che, essendo esterno, un off-board non influisce nell'autonomia di un veicolo e quindi può avere componenti più prestanti permettendo di ottenere una maggiore potenza di ricarica.

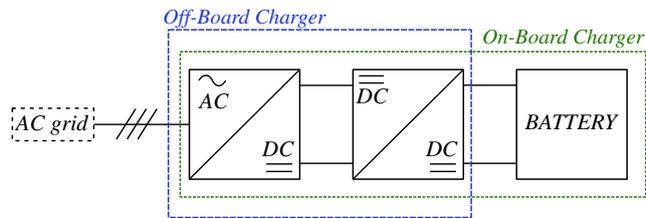


Figura 12: Componenti di un sistema di ricarica [12].

In letteratura i convertitori sono divisi in tante categorie, una delle quali è la suddivisione in base al flusso dell'energia, distinguendoli in: monodirezionali, nei quali la potenza fluisce dalla rete elettrica alla batteria e bidirezionali, dove essa può scorrere anche in senso opposto.

Usando i convertitori bidirezionali, il veicolo elettrico è considerato dalla rete di alimentazione una sorgente di energia e può essere utilizzato per la stabilizzazione della rete stessa, assorbendo i picchi di potenza e iniettando energia quando la richiesta è superiore alla domanda. L'utilizzo più appropriato dei convertitori bidirezionali è tutt'ora un campo di ricerca, in quanto sono destinati ad essere utilizzati nelle smart grid. Tuttavia si trovano molto spesso all'interno dei caricatori, ma funzionano semplicemente come dei monodirezionali. In letteratura i convertitori possono essere suddivisi in convertitori isolati nei quali, attraverso un trasformatore, si attua un isolamento galvanico tra la rete e il sistema di ricarica. Il trasformatore può essere inserito o lato rete o lato veicolo.

### 1.7.1 On-board Charger (Singolo Stadio)

Essendo questo caricatore interno all'autoveicolo, requisiti di compattezza e leggerezza sono fondamentali per non incidere in modo significativo nell'autonomia. Da questo punto di vista gli on-board charger si dividono in due sotto categorie. i convertitori ad uno stadio e a due stadi.

La tipologia ad uno stadio offre una struttura semplice con un ridotto numero di componenti ed è composta dal solo raddrizzatore AC/DC, il primo blocco in fig. 12. Il ruolo del raddrizzatore AC/DC è convertire la tensione di rete sinusoidale in una tensione continua compatibile con l'architettura della batteria. In generale i raddrizzatori possono essere realizzati con componenti non controllati come nel caso del raddrizzatore a ponte a diodi. Tuttavia le tipologie utilizzate nei veicoli elettrici dispongono sempre di un'unità di controllo, in modo da permettere il loro funzionamento da PFC (*Power Factor Correction*) con l'obiettivo di:

- rendere unitario il fattore di potenza;
- operare una diminuzione del THD (*Total Harmonic Distorsion*) di corrente.

Nel mondo automotive un sistema di ricarica con un singolo caricatore non viene mai utilizzato. In fig. 13 viene riportata la classica configurazione di un caricatore a singolo stadio, si noti il trasformatore di disaccoppiamento posto tra la rete e il convertitore.

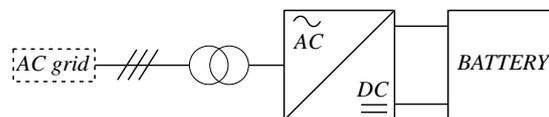


Figura 13: On-Board Charger a Singolo stadio [12].

#### Convertitore AC/DC Boost PFC

In questa tipologia di convertitore mono direzionale, allo stadio di raddrizzamento composto da un ponte a diodi, è stato aggiunto un convertitore boost in modo da implementare il funzionamento da PFC. Ad elevate correnti, per effetto della caduta di tensione su ogni diodo dello stadio di raddrizzamento, la potenza dissipata è elevata. Questo fa diminuire l'efficienza complessiva del sistema rendendo la configurazione di fig. 14(a) utilizzata solo per potenze fino a 1 kW.

Per sopperire a ciò, una variante può essere la configurazione di fig. 14(b), dove si utilizza una configurazione interleaving che divide la potenza in più rami. Questa configurazione risolve sia i problemi di dissipazione che di interferenza elettromagnetica ed è utilizzata per potenze anche superiori ai 3.5 kW. [4]

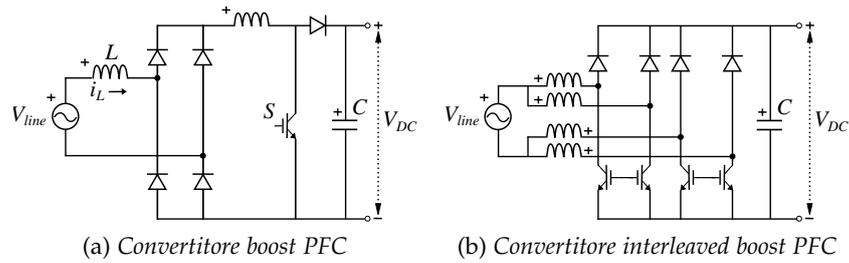


Figura 14: Convertitore Boost [4].

### Convertitore AC/DC Half Bridge

Il convertitore Half Bridge, fig. 15, è il convertitore bidirezionale più semplice grazie al ridotto numero di componenti. In ogni ramo sono presenti due switch comandati da un segnale PWM complementare. È generato da una logica di controllo composta da un anello interno di corrente e uno esterno di tensione, questo permette il funzionamento da PFC e la regolazione della tensione in uscita  $V_{DC}$ . Il punto critico di questo convertitore riguarda i due condensatori lato DC, aggiungono peso e occupano spazio nel caricatore, oltre a far diminuire l'affidabilità. Essi devono essere bilanciati, cioè la tensione deve essere la medesima. Per fare ciò è necessario aggiungere un'ulteriore anello di controllo della corrente di bilanciamento che fa inevitabilmente aumentare la complessità circuitale.

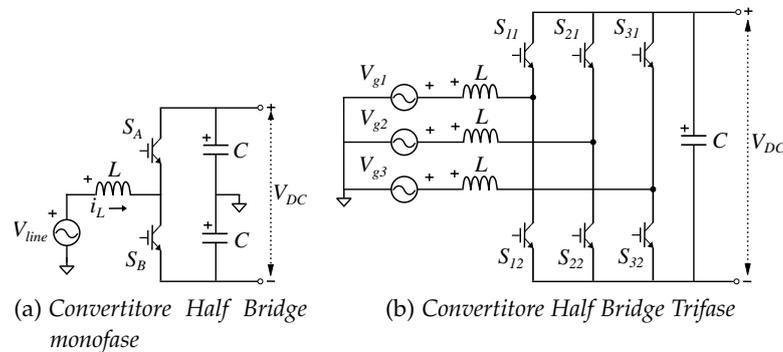


Figura 15: Convertitore Half Bridge.

### Convertitore AC/DC Full Bridge

Il convertitore Full Bridge, fig. 16, chiamato anche "Ponte H", è composto da 4 switch per ogni fase. È inoltre possibile operare una modulazione a tre livelli contro i 2 livelli possibili nell'Half Bridge e implementare tecniche di riduzione delle perdite di commutazione come la ZVS (*Zero Voltage Switching*). La tensione massima viene ripartita tra due interruttori e non in uno solo come succedeva nell'Half Bridge. Quindi è possibile scegliere dei componenti più piccoli, dato che la

taglia degli IGBT viene in genere data dalla tensione massima ammissibile. Questa tipologia di convertitore AC/DC è il più utilizzato. Lo schema riportato in fig. 16 si riferisce ad una architettura monofase (la trifase è possibile realizzarla accoppiando 3 convertitori monofase).

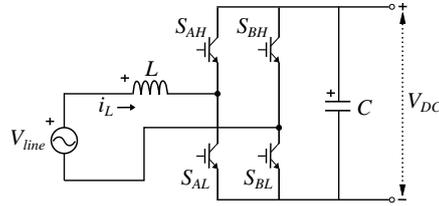


Figura 16: Convertitore Full Bridge monofase.

### Convertitore AC/DC Multi livello

Un ulteriore tipologia di convertitori controllati e bidirezionali è rappresentata dai multi livello. Il nome deriva dalla presenza di un numero maggiore di interruttori nello stesso ramo i quali permettono di riprodurre in uscita più livelli di tensione.

Il maggior numero di interruttori permette di diminuire lo stress di tensione sugli switch, le perdite per commutazione, le armoniche e si massimizza il fattore di potenza ottenendo inoltre una migliore regolazione del ripple di tensione lato DC. I convertitori multi livello sono utilizzati per applicazioni ad elevata potenza e a elevate tensioni. Ovviamente, essendoci un numero più elevato di componenti, la complessità del circuito di controllo è maggiore e questi aspetti rendono questa tipologia di convertitori più costosi e quindi meno utilizzati rispetto ai Full Bridge.

Esistono più tipologie di questo convertitore, in fig. 17 è riportato uno a 3 livelli diode clamped trifase. [4]

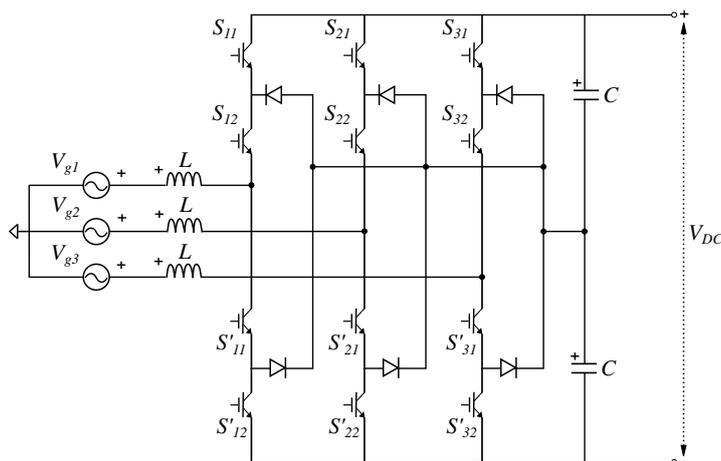


Figura 17: Convertitore a 3 livelli diode-clamped trifase [4].

### Convertitori non isolati

Come verrà trattato in seguito, la maggior parte dei caricatori utilizzati nei veicoli elettrici è a due stadi e dotata di un trasformatore ad alta frequenza. Tuttavia la presenza del trasformatore non viene espressamente richiesta dalle normative sulla sicurezza nei veicoli elettrici e, non ci sono ragioni costruttive per le quali la batteria deve essere isolata dall'ingresso. Il non utilizzare un trasformatore all'interno del caricatore porta con sé una serie di vantaggi: diminuisce il peso e il volume del sistema e aumenta l'efficienza; visto che il numero di componenti necessari è minore.

Diversi studi hanno dimostrato che l'utilizzo di un caricatore senza trasformatore causa delle maggiori difficoltà nel caso in cui tensioni di ingresso e uscita presentino un elevato intervallo di variazione. Pertanto, se si vuole evitare l'utilizzo di un trasformatore, si deve implementare una struttura a cascata per permettere l'adattamento delle tensioni. [13]

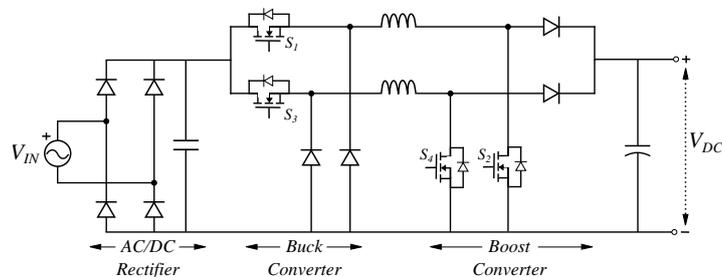


Figura 18: Configurazione caricatore on-board da 3.7 kW a singolo stadio [13].

In fig. 18 è riportato un possibile caricatore monofase da 3.7 kW che ricorre all'utilizzo del trasformatore. La tensione di ingresso può variare tra 120 V e 240 V e tra una frequenza di 45 Hz e 70 Hz, mentre la tensione di uscita è regolata tra 270 V e 430 V. In questa tipologia di convertitori il PFC e le funzioni di innalzamento e abbassamento della tensione sono contenuti tutti in uno stadio rendendo minimo il numero di componenti e massimizzando, di conseguenza, l'efficienza globale.

Il caricatore di fig. 18 è composto da un raddrizzatore monofase, connesso in serie ad un convertitore buck e ad un boost, ognuno dei quali dotato di due interruttori per massimizzare l'efficienza e ridurre il ripple di corrente sia in ingresso che in uscita suddividendola su due induttori.

Il caricatore può funzionare in tre diversi modi: buck, boost e buck boost. Funziona da convertitore buck quando la tensione di ingresso raddrizzata è maggiore della tensione di uscita; da boost invece, quando la tensione di ingresso è minore di quella in uscita e deve essere quindi innalzata; funziona da buck-boost nel momento in cui le due tensioni sono circa uguali. I

n tab. 6 sono riportati gli stati degli switch in base al modo di funzionamento.

Stato Buck	Stato Boost	Modo di funzionamento
PWM on	PWM off	modalità Buck
PWM off	PWM on	modalità Boost
PWM on	PWM on	modalità Buck-Boost

Tabella 6: Stati di funzionamento [13].

Questo caricatore permette di raggiungere una efficienza di picco superiore al 96.7%, in tab. 7 ne sono riportati i dati di targa.

Parametri	Valore	Descrizione
$V_{IN}$	120,208,240 V	Tensione rms AC in ingresso
$V_{OUT}$	270–430 V	Tensione in uscita a potenza nominale
$P_{max}$	3.7 kW	Potenza nominale
THD	<4%	THD lato rete a potenza nominale
$\eta$	96.7%	Efficienza complessiva

Tabella 7: Specifiche caricatore on-board da 3.7 kW singolo stadio [13].

### 1.7.2 On-board Charger (Doppio Stadio)

Nel mercato delle autovetture elettriche i caricatori on-board sono sempre composti da due stadi. Scelta dettata dal fatto di renderli flessibili a più modalità di funzionamento.

Tipicamente agli on-board charger viene richiesta la capacità di controllare la tensione di uscita in un range compreso tra il  $\pm 30\%$  della tensione nominale della batteria, in modo tale da adattarsi alle varie condizioni di carica della stessa. Per queste ragioni nei caricatori a doppio stadio possono essere adottate le seguenti soluzioni:

1. delle elevate frequenze di commutazione degli interruttori;
2. l'utilizzo di un trasformatore alta frequenza. A differenza dei convertitori a singolo stadio, dove il trasformatore era posto a monte del sistema, nei doppio stadio isolati si utilizzano dei convertitori DC/DC isolati. Questa soluzione permette di ridurre il peso del caricatore, dal momento che al crescere della frequenza di commutazione diminuiscono le dimensioni dei componenti. Inoltre, sia il funzionamento da step down e da step up è possibile in modo da soddisfare l'ampio range di tensione di ingresso e uscite richieste;

3. per diminuire le perdite di commutazione vengono implementate tecniche come la ZVS utilizzando tipologie di convertitori risonanti SRC o LLC.

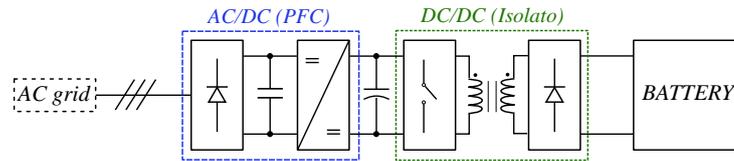


Figura 19: Struttura convertitore a due stadi [13].

In fig. 19 è riportata la struttura di un convertitore a due stadi isolato. Se ogni stadio permettesse di raggiungere un'efficienza del 97 %, l'efficienza complessiva sarebbe circa del 94 %. Questo aspetto rappresenta un limite di questa tipologia di struttura. Infatti l'utilizzo di un trasformatore ad alta frequenza comporta sì una diminuzione del peso, data la taglia più piccola dei componenti, però genera una diminuzione dell'efficienza, in quanto il numero maggiore di commutazioni comporta una maggiore dissipazione di potenza.

Non essendo disponibili alla libera consultazione le configurazioni circuitali degli on-board charger presenti nel mercato, sono state prese tre diverse proposte di convertitori presenti in letteratura.

### 3.3kW On-board charger

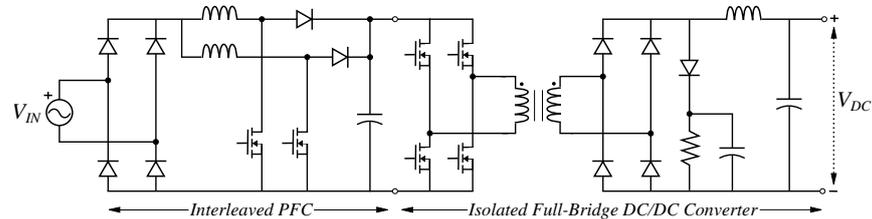


Figura 20: Configurazione caricatore on-board da 3.3 kW [14].

Il caricatore on-board di fig. 20 ha una potenza nominale di 3.3 kW ed è composto da due stadi: un raddrizzatore PFC AC/DC seguito da un convertitore DC/DC isolato. La soluzione proposta presenta un'efficienza massima del 93.6 % e permette la regolazione della tensione di uscita tra 200 e 450 V con un peso di 6.2 kg.

Dopo il raddrizzatore a ponte a diodi è posto un PFC costituito da due convertitori boost operanti in CCM (*Continuous Conduction Mode*), ognuno dei quali lavora per la metà della potenza nominale. Gli switch sono dei mosfet comandati con un segnale PWM non in fase: questa tecnica ha l'effetto di raddoppiare l'effettiva frequenza di commutazione comportando una diminuzione del ripple di corrente dal momento che esso è funzione della frequenza di commutazione.

Il secondo stadio è composto da un convertitore DC/DC Full Bridge isolato, nel quale è implementata la ZVS utilizzando le induttanze

parassite dei trasformatori, in aggiunta all'induttore esterno e alla capacità in uscita degli switch. Questo convertitore Full Bridge presenta un comportamento simile a quello tradizionale, la differenza sta nel fatto che invece di pilotare gli switch in diagonale con lo stesso duty cycle quelli in basso sono guidati con un duty cycle fisso al 50% mentre quelli superiori sono comandati da un ulteriore segnale PWM.

La frequenza di commutazione del PFC e del convertitore DC/DC può essere selezionata tra 60 e 200 kHz. Per massimizzare l'efficienza e rispettare i limiti di emissione elettromagnetica, la frequenza di switching è stata scelta pari a 66 kHz. Visto che tutti i componenti del sistema di ricarica sono stati dimensionati per lavorare a 66 kHz, l'efficienza è massima proprio per questo valore; tuttavia si è notato che se anche si lavorasse a 200 kHz e alla potenza nominale le perdite sarebbero maggiori solo del 2.3%.

Le specifiche di funzionamento di questo caricatore sono riportate in tab. 8.

Parametri	Valore	Descrizione
$V_{IN}$	85 – 265 V	Tensione rms AC in ingresso
$V_{OUT}$	200 – 450 V	Tensione in uscita a potenza nominale
$P_{max}$	3.3 kW	Potenza nominale
PF	0.99	Fattore di Potenza a 240 V
$\eta$	94%	Efficienza complessiva

Tabella 8: Specifiche caricatore on-board da 3.3 kW [14].

### 6.6 kW On-board charger

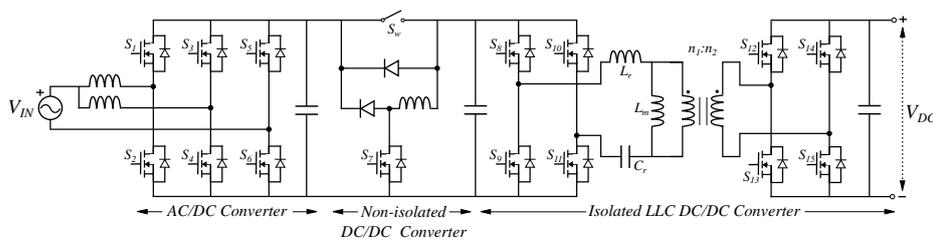


Figura 21: Configurazione caricatore on-board da 6.6 kW [15].

Un'ulteriore taglia di caricatore è quella riportata in fig. 21: si tratta di un on-board charger da 6.6 kW monofase con un valore nominale di potenza molto elevata per essere un caricatore monofase. Esso permette un controllo della tensione in uscita tra 240 e 420 V. È un caricatore a due stadi e bidirezionale: quando lo switch  $S_w$  è aperto la potenza fluisce dalla rete alla batteria, mentre quando è chiuso si inverte il flusso di energia.

Il primo stadio è composto da un raddrizzatore controllato che opera una correzione del fattore di potenza e la tensione di uscita dal

PFC è regolata tra 360 e 400 V. Si utilizzano come interruttori per lo stadio di raddrizzamento e per il convertitore DC/DC dei SiC Mosfet (al carburo di silicio) che hanno una tensione di breakdown di 900 V e permettono di lavorare ad altre frequenze di commutazione pur mantenendo una bassa  $R_{ON}$ , resistenza di conduzione.

La regolazione della tensione in uscita avviene per mezzo di un convertitore LLC risonante isolato operante a 100 kHz. Questa tipologia viene molto spesso utilizzata nei caricatori per veicoli perché, utilizzando tecniche di soft-switching, si riducono le perdite di commutazione portando un diretto incremento dell'efficienza complessiva del sistema. Inoltre in questo caricatore, a differenza del precedente dove si utilizzava un ponte a diodi per il raddrizzamento finale della tensione, viene utilizzato un raddrizzatore sincronizzato che permette un ulteriore miglioramento della prestazione del sistema rendendo possibile anche il trasferimento di potenza in senso opposto.

Una peculiarità di questo caricatore è che attivando lo switch  $S_w$ , si inverte la direzione del flusso di potenza, in questo caso l'on-board charger si comporta da scaricatore, preleva l'energia dalla batteria e la immette in rete. Quando il caricatore funziona in questa modalità entra in funzione il convertitore boost avente come switch l'interruttore Q7, esso ha la funzione di amplificare la tensione proveniente dal convertitore DC/DC per portarla ad un livello che renda possibile, al PFC bidirezionale, di immettere energia in rete.

L'efficienza del convertitore DC/DC quando lavora come caricatore è del 96.37% ad una tensione di uscita di 336 V e una potenza di 6.6 kW, mentre quando lavora come scaricatore l'efficienza è del 98.87% con 380 V e 3.3 kW, questo è dovuto al fatto che il convertitore LLC risonante presenta una efficienza più elevata quando la potenza fluisce dall'ingresso alla batteria, tuttavia una efficienza del 98.87% è elevata se confrontata con altre soluzioni presenti nel mercato.

I dati di targa sono riportati in tab. 9.

Parametri	Valore	Descrizione
$V_{IN}$	85–265 V	Tensione rms AC in ingresso
$V_{OUT}$	240–420 V	Tensione in uscita a potenza nominale
$P_{max}$	6.6 kW	Potenza nominale
THD	<5 %	THD lato rete a potenza nominale
$\eta$	94 %	Efficienza complessiva

Tabella 9: Specifiche caricatore on-board da 6.6 kW [15].

### 20 kW On-board charger

Un convertitore da 20 kW è riportato in fig. 22. È composto da un convertitore trifase AC/DC half bridge seguito da due convertitori DC/DC LLC risonanti e isolati, connessi in serie al primario e in parallelo

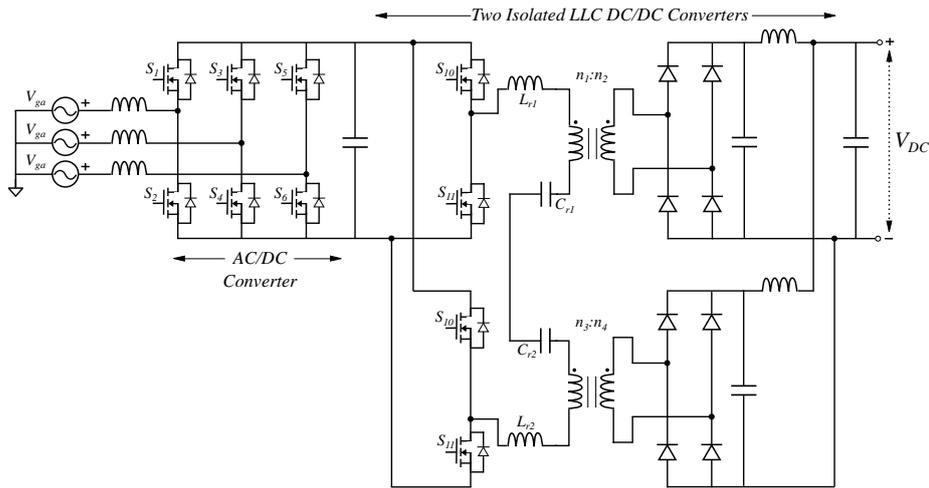


Figura 22: Configurazione caricatore on-board da 20 kW [16].

al secondario. Come nel caricatore da 6.6kW, anche in questo caso, gli interruttori utilizzati sono dei SiC Mosfet con tensione di breakdown di 1200 V, visto che la tensione di alimentazione sarà di 400 V efficaci e non più monofase. La tensione in uscita dal convertitore AC/DC, il quale realizza anche la funzione di PFC, è di 600 V.

Avendo due convertitori LLC risonanti che lavorano in parallelo, si ha che ognuno lavora ad una potenza pari alla metà di quella nominale. Questo permette di ottenere minori perdite nei trasformatori e nei diodi al secondario. I convertitori risonanti possono lavorare sia in DCM che in CCM in funzione delle condizioni di carico e della frequenza di switching, è inoltre possibile implementare tecniche di ZVS per ridurre le perdite di commutazione. Il segnale di comando PWM è sfasato di 180 deg in modo tale che i due half bridge possano lavorare come un unico full bridge. Utilizzando una connessione a stella al primario i componenti risonanti, (condensatore e induttore), condividono la stessa corrente. Si vanno a mitigare eventuali effetti indesiderati dovuti alla non bilanciata suddivisione della potenza. Il solo contributo di sbilanciamento proviene dalle mutue induttanze del trasformatore, tuttavia esso può essere mitigato da una più attenta costruzione degli avvolgimenti.

In questa configurazione la tensione  $V_{DC}$  in uscita varia tra 200 e 450 V. Nel caso in cui fosse richiesta una maggiore tensione, è possibile riconfigurare il secondario e passare da una configurazione in parallelo, ad una in serie permettendo di avere una tensione compresa tra 400 e 900 V. Questa flessibilità rende possibile utilizzare lo stesso caricatore in veicoli che hanno una architettura della batteria differente. La frequenza di commutazione del PFC è di 100 kHz mentre quella dei convertitori varia tra 100 e 150 kHz con il primo punto di risonanza a 120 kHz.

In tab. 10 sono riportati i dati di targa del caricatore.

Parametri	Valore	Descrizione
$V_{IN}$	400 V	Tensione rms line-line AC in ingresso
$V_{OUT}$	360–450 V	Tensione in uscita a potenza nominale
$P_{max}$	20 kW	Potenza nominale
THD	<5 %	THD lato rete a potenza nominale
$\eta$	96 %	Efficienza complessiva

Tabella 10: Specifiche caricatore on-board da 20 kW [16].

### *On-board charger nel mercato*

In tab. 11 sono riportati i datasheet di 3 diversi on-board charger presenti nel mercato che possono essere installati nelle vetture. Si osserva come all'aumentare della potenza il peso e il volume del sistema di ricarica aumenta in modo considerevole, tutti i caricatori considerati sono raffreddati a liquido.

Parametri	GlobalPower	GlobalPower	Innolectric
$V_{IN}$	85–265 V	85–265 V	380–480 V
$V_{OUT}$	200–430 V	200–430 V	220–510 V
$P_{max}$	3.3 kW	6.6 kW	22 kW
$\eta$	>95 %	>95.5 %	95 %
Peso	3.7 kg	4 kg	18 kg
Volume	3.2 L	4 L	24.25 L

Tabella 11: Datasheet on-board charger [17][18][19].

### 1.7.3 *Integrated on-board charger*

Nella maggior parte dei veicoli elettrici il caricatore è separato dall'inverter che alimenta il motore elettrico. Ciononostante esiste una categoria di caricatori, gli Integrated on-board charger, che nello stesso dispositivo integrano sia la funzione di caricatore che quella di inverter. L'utilizzo di dispositivi integrati porta ad un miglioramento dell'efficienza globale del veicolo perché, riducendo il numero dei componenti, si ha una diminuzione della massa del sistema di alimentazione e una maggiore affidabilità.

Questa tipologia di caricatori molto spesso non è presente nei veicoli e si trova ancora in fase di sperimentazione dato che, richiede la presenza di un controllo più complesso.

### *Caricatore integrato usando gli avvolgimenti trifase dello statore*

Una tipologia di caricatore integrato è quello che utilizza gli avvolgimenti trifase presenti nello statore del motore per realizzare la parte

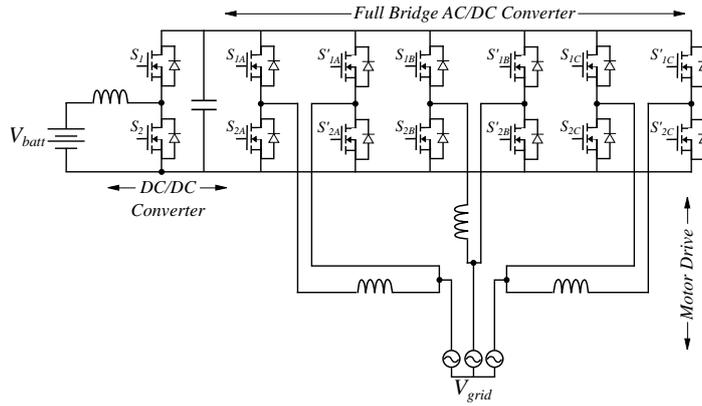


Figura 23: Caricatore on-board integrato usando gli avvolgimenti trifase del motore [20].

AC/DC del caricatore. Il caricatore di fig. 23 è composto da tre convertitori full bridge pilotati da un segnale PWM connessi simultaneamente alla rete elettrica e al motore, mentre nella parte DC è presente un convertitore buck-boost. Il caricatore può essere collegato sia ad una rete trifase che monofase, permettendo di ottenere un fattore di potenza unitario. La maggior riduzione di peso e volume è data dall'utilizzo delle induttanze degli avvolgimenti del motore come filtro lato rete. È una tipologia non isolata e richiede un elevato numero di interruttori. Inoltre, per evitare la rotazione del rotore durante le fasi di ricarica, è necessario bloccare meccanicamente lo stesso. [20]

#### *Caricatore integrato basato su l'utilizzo dei PMSM*

PMSM è l'acronimo di Permanent magnet synchronous motors, cioè motori sincroni a magneti permanenti. Essi rappresentano la tipologia di motore elettrico più utilizzato in quanto, l'efficienza e il rapporto potenza/volume, sono maggiori rispetto ad altre tipologie di macchine elettriche. Questa tipologia di circuito contiene un inverter full bridge trifase e un convertitore DC/DC bidirezionale, supporta 5 modalità di funzionamento: trasferimento di potenza dalla batteria al DC bus, funzioni di frenata rigenerativa per la carica della batteria, carica della batteria dalla rete, funzionalità da inverter e trasferimento di potenza dalla batteria all'inverter. Questo caricatore, pur riducendo il numero degli induttori, raggiunge un'efficienza leggermente inferiore rispetto alla sua controparte unidirezionale, per effetto delle maggiori perdite di conduzione. [20]

#### *Caricatore integrato basato sull'ampliamento dell'inverter*

Il caricatore in fig. 24 utilizza un inverter con 8 interruttori e un convertitori DC/DC. L'inverter possiede 4 modalità di funzionamento: convertitore DC/AC per alimentare il motore, funzionamento da PFC monofase connesso alla rete per ricaricare la batteria, funzionamento

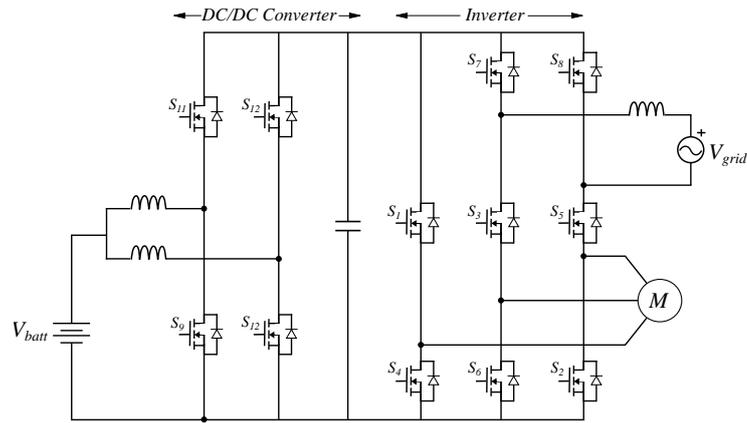


Figura 24: Caricatore on-board integrato basato sull'ampliamento dell'inverter [20].

da convertitori DC/AC per trasferire potenza dal motore alla batteria e come convertitori bidirezionale per permettere alla batteria di immettere energia in rete.

Attraverso il controllo è possibile implementare le varie modalità di funzionamento senza l'utilizzo di interruttori che sezionerebbero il circuito. [20]

#### 1.7.4 Stazioni Fast e Ultra Fast

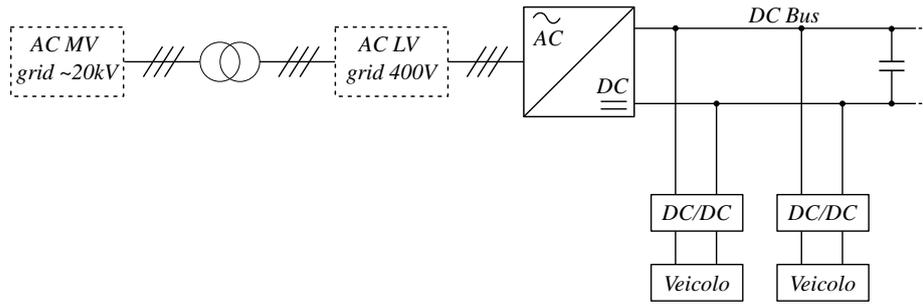
Come discusso in precedenza, gli off-board charger sono strutturalmente molto simili agli on-board charger, con la sostanziale differenza di essere posizionati al di fuori del veicolo. Dato che dimensioni e peso non sono più un problema, essi possono erogare elevate potenze, permettendo la ricarica rapida in corrente continua.

Da questa idea nasce il concetto di stazione fast o ultra fast, cioè un luogo pubblico dove sono posizionati più off-board charger, chiamati anche colonnine, dove i veicoli elettrici sostano per essere ricaricati.

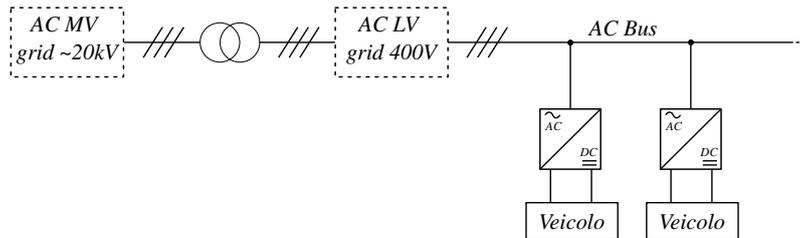
Convenzionalmente si parla di stazione di ricarica fast quando la potenza erogata non supera i 100 kW, mentre le stazioni ultra fast permettono di superare i 350 kW riducendo drasticamente il tempo di ricarica e permettendo la possibilità di compiere anche lunghi spostamenti in tempi comparabili con quelli delle automobili a combustione interna.

La funzione principale di una stazione di ricarica fast/ultra fast è ovviamente quella di caricare la batteria il più velocemente possibile. D'altra parte però, la stazione essendo connessa alla rete elettrica, deve essere in grado di operare alcune specifiche operazioni come quella di PFC svolta dal convertitore AC/DC già discussa precedentemente.

Dato che la potenza richiesta da una stazione di ricarica può facilmente raggiungere valori anche superiori ad 1 MW, essa viene con-



(a) Configurazione con DC bus.



(b) Configurazione con AC bus

Figura 25: Configurazione stazione di ricarica fast/ultra fast [21].

nessa ad una rete a media tensione. La presenza di un trasformatore operante alla frequenza di rete, permette l'adattamento delle tensioni a quelle compatibili alla bassa tensione ( $230 V_{\text{RMS}}$  line-line). Le stazioni di ricarica possono avere due configurazioni come riportato in fig. 25: con un bus in AC o un bus in DC.

Nella configurazione con bus in AC, ogni stallo di ricarica dispone di una stadio di raddrizzamento e di conversione in DC. La maturità in termini di affidabilità raggiunta da questa tipologia, l'ha resa la configurazione più utilizzata nei sistemi di ricarica ultra fast. Tuttavia si ha una efficienza globale che dipende dal numero di veicoli in ricarica, infatti, il convertitore AC/DC presenta una efficienza che varia in funzione della potenza erogata e di conseguenza esisterà un valore per il quale l'efficienza è massima. In questa configurazione la complessità del controllore, utilizzato per assicurare una bassa distorsione armonica e un fattore di potenza unitario, è più elevata rispetto alla configurazione con bus in DC.

La configurazione con bus in DC è più flessibile rispetto a quella in AC, dal momento che è possibile integrare facilmente delle risorse rinnovabili e inserire batterie con funzionalità da buffer semplicemente connettendole al bus. Inoltre si eliminano i problemi di compensazione della potenza reattiva nel bus e il numero di componenti è minore, questo rende l'efficienza del sistema più elevata. Un esempio di questa configurazione lo si trova in una stazione supercharger Tesla dove possono esserci anche più di 24 stalli con un convertitori AC/DC condiviso tra due postazioni per un totale di 12 convertitori AC/DC e 24 DC/DC.

Una comparazione tra le due architetture è riportata in tab. 12.

Parametri	AC Bus	DC Bus
<i>Maturità tecnica</i>	Alta	Bassa
<i>Disponibilità</i>	Alta	Bassa
<i>Complessità</i>	Alta	Bassa
<i>Efficienza</i>	Bassa	Alta
<i>Funzionamento senza rete</i>	SI	NO
<i>Costo</i>	Alto	Basso

Tabella 12: Comparazione tra configurazione di bus

Se invece viene installata una sola colonnina, questa per ovvie ragioni di potenza non è collegata ad una linea a media tensione, ma a una a bassa non rendendo necessaria la presenza del primo trasformatore. Nel caso di una rete a bassa tensione, il trasformatore può essere posto lato AC e operare alla frequenza di rete oppure si possono utilizzare tipologie di convertitori DC/DC isolati. Quest'ultimi lavorano a frequenze migliaia di volte superiori a quelle di rete, minimizzano la taglia del trasformatore.

Le tipologie di convertitori utilizzati in una stazione ultra fast sono le stesse già precedentemente viste negli on-board charger, con la differenza che si utilizzano più moduli posti in parallelo per aumentare la potenza di uscita.

Come in precedenza, si analizzano varie soluzioni presenti in letteratura.

#### Caricatore ultra fast da 300 kW

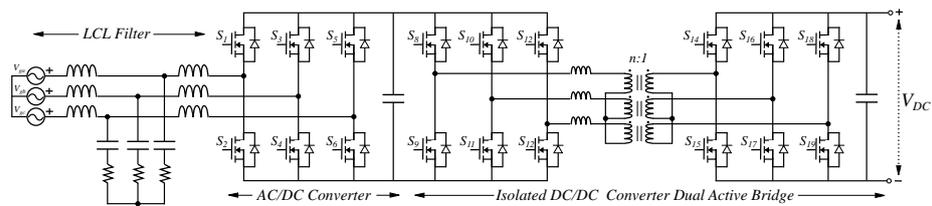


Figura 26: Caricatore fast da 100kW [22].

Questo caricatore è composto da un raddrizzatore trifase non isolato che opera la funzione di PFC. Per ottenere un fattore di potenza unitario è presente un filtro attivo di tipo LCL, tipologia molto comune in tutte le applicazioni ad elevata potenza. Questo stadio è seguito da un convertitore DC/DC isolato dual active bridge, può essere connesso ad una rete trifase e la tensione raddrizzata varia tra 250 e 420 V, oppure, tra 500 e 800 V in funzione dell'architettura della batteria. La tensione di rete è raddrizzata ad un valore di 700 V, gli interruptori utilizzati in entrambi i convertitori sono dei SiC Power Mosfet con tensioni di breakdown di 1200 V e corrente nominale di 300 A.

Utilizzando questi componenti, e una tecnica di modulazione SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) per il primo stadio, è possibile dimostrare che la potenza massima che può essere trasferita dal convertitore AC/DC al DC/DC è 304.5 kW. In egual modo, è possibile determinare la potenza erogabile dal convertitore DC/DC, si dimostra che la massima potenza erogabile in uscita dal convertitore in questa configurazione è di 100 kW. Di conseguenza, per raggiungere la potenza di 300 kW, è necessario disporre in parallelo tre convertitori DC/DC di fig. 26.

Nella connessione in parallelo si utilizza una tecnica di controllo interleaving che permette di minimizzare le ondulazioni di corrente e tensione, richiedendo di conseguenza induttori e condensatori più piccoli.

#### 1.7.4.1 Stazioni ultra fast con accumulo

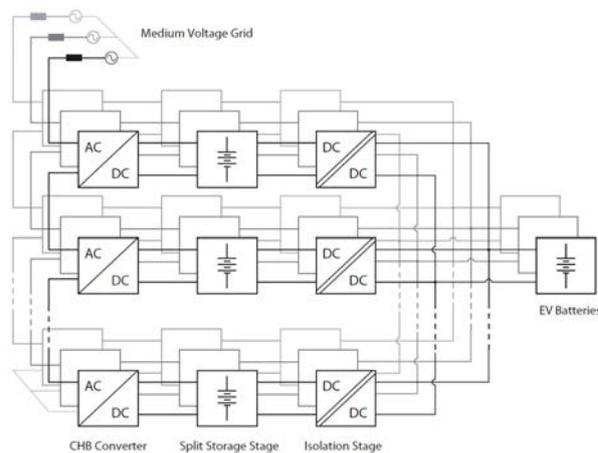


Figura 27: Caricatore ultra fast da 250 kW [23].

Come sottolineato in precedenza, le stazioni di ricarica ultra fast hanno la necessità di essere collegate ad una rete elettrica ad elevata capacità dato che, l'assorbimento in situazioni di massimo carico può superare facilmente il MW. Tuttavia la richiesta di energia dalla rete non è costante e dipende dal numero di veicoli che sono in carica. Per ovvie ragioni di sicurezza, il dimensionamento della stazione deve essere fatto ai valori massimi anche se questi sono mantenuti per poco tempo rispetto alle situazioni di medio carico generando così un inutile aumento del costo. Per sopperire a questo problema, sono in sviluppo delle stazioni in cui nel bus in continua di fig. 25, viene collegata una batteria. Essa ha la funzione di stabilizzare l'assorbimento dalla rete comportandosi da buffer, si carica quando la richiesta di energia da parte dei veicoli è bassa e si scarica quando la richiesta aumenta. Per effetto di ciò il dimensionamento della stazione lato rete può essere fatto ai valori medi di carico. Questo porta una

diminuzione dei costi che vengono però compensati dal costo della batteria.

Questa tipologia di stazione di ricarica verrà utilizzata in futuro dove la rete di elettrica non è in grado di erogare elevate potenze in modo continuativo.

Una tipologia di caricatore che sfrutta una batteria intermedia è riportato in fig. 27. A differenza dei precedenti, questo è collegato direttamente alla rete a media tensione senza l'utilizzo di un trasformatore a bassa frequenza. Lo stadio di raddrizzamento è composto da una cascata di convertitore H-Bridge (CHB) bidirezionali in potenza implementati utilizzando una configurazione full bridge simile a quella in fig. 28(a), seguiti da una batteria che ha la funzione di stabilizzare la richiesta di potenza. Il veicolo si interfaccia con il CHB attraverso dei convertitori DC/DC isolati collegati in parallelo. Il caricatore in esame può essere collegato ad una rete a media tensione operante a  $V_{1-1} = 11 \text{ kV}$ , la tensione di uscita varia tra 100 e 600 V in base all'architettura della batteria del veicolo da ricaricare.

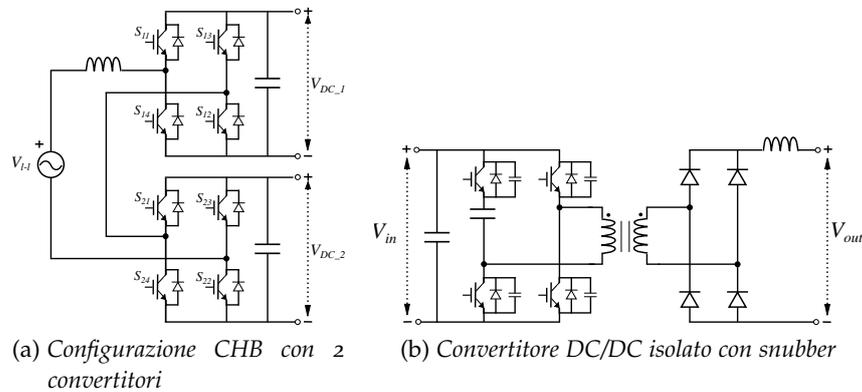


Figura 28: Componenti caricatore ultra fast da 250 kW.

Questa configurazione modulare offre una serie di vantaggi in termini di controllo del flusso di potenza e di gestione dei carichi e permette il collegamento di un veicolo per ogni fase garantendo con tensioni indipendenti l'uno dall'altro. Definito con  $N$  il numero di convertitori CHB in serie, questo convertitore può produrre fino a  $2N+1$  livelli di tensione per ciascuna fase. Questo assicura una elevata risoluzione della tensione in uscita e, allo stesso tempo, un ridotto ripple di corrente con un basso contenuto armonico che permette di non utilizzare dei filtri lato rete. La presenza di un'ondulazione di tensione e corrente molto bassa in uscita dai CHB permette un incremento della vita utile della batteria.

A valle della batteria si trovano i convertitori isolati DC/DC full bridge (fig. 28 b). L'implementazione di un segnale di comando sfasato, per effetto dei tempi morti tra due interruttori della stessa gamba, permette di implementare lo zero voltage switching comportando una diminuzione delle perdite di commutazione. Inoltre possono es-

Parametri	Valore	Descrizione
$V_{L1}$	11 kV	Tensione rms fase fase
$N_{\text{cell AC}}$	13	Numero di convertitori per fase
$f_{\text{sw}}$	500 Hz	Frequenza di commutazione CHB
$f_s$	10 kHz	Frequenza di commutazione convertitore DC/DC
$P_{\text{max}}$	250 kW	Potenza di ricarica per fase
$N_{\text{ch}}$	3	Massimo numero di veicoli in carica

Tabella 13: Specifiche caricatore ultra fast da 250 kW [23].

sere usati opportuni circuiti di snubber per permettere lo ZVS anche nella fase di spegnimento degli interruttori.

I convertitori DC/DC sono collegati tra di loro in parallelo in modo da ottenere in uscita elevate correnti. Essi operano ad una frequenza di 10 kHz con una potenza nominale per fase di 250 kW, in tab. 13 sono riportati i dati di targa del caricatore.

#### Stazioni ultra fast nel mercato

In tab. 14 sono riportati i valori massimi presenti nei datasheet di tre diversi produttori di colonnine di ricarica ultra rapide. Si noti come il peso e lo spazio occupato da questi sistemi sia molto elevato. Analizzando con accuratezza i datasheet si nota come tutti questi caricatori presentino delle strutture modulari la cui potenza può essere variabile in funzione dei moduli installati, inoltre, si osserva come la potenza di ricarica vari in funzione del tipo di connettore utilizzato.

Parametri	Tritium Veefil	Avttec	Delta
$V_{\text{IN}}$	2x 3 – $\Phi$ 480 V	3 – $\Phi$ 400 V	3 – $\Phi$ 400 V
$V_{\text{OUT}}$	fino a 920 V	170 – 1000 V	200 – 1000 V
$I_{\text{OUT}}$	500 A	300 A	500 A
$P_{\text{max}}$	350 kW	150 kW	150 kW
Efficienza	>98 %	95 %	95 %
Connettore	CCS2/CHAdeMO		
Peso	700 kg	400 kg	450 kg
Dimensioni	2350 x 603 x 1230 mm	930 x 2000 x 850 mm	-

Tabella 14: Datasheet stazioni ultra fast [24][25][26].



## ARCHITETTURA DELL'ACCUMULATORE

---

### 2.1 LA BATTERIA

Contrariamente a come spesso si fa riferimento, un accumulatore e una batteria non sono la stessa cosa. Infatti, le batterie possono essere divise in due categorie: batterie primarie e secondarie. Si parla di primarie, quando una volta scaricate, esse non possono più essere riutilizzate; mentre le secondarie sono chiamate anche batterie ricaricabili o accumulatori.

Una batteria ha la funzione di accumulare energia in forma chimica e, a richiesta, convertirla in energia elettrica attraverso un processo elettrochimico, nel quale i materiali che reagiscono dipendono dal tipo di batteria utilizzata. Una generica batteria è composta da un anodo (elettrodo negativo), un catodo (elettrodo positivo) e un elettrolita posto tra i due elettrodi, il quale rappresenta il mezzo con cui si trasferisce la carica elettrica. La trasformazione dell'energia avviene attraverso una reazione di ossidoriduzione detta anche *redox*, nella quale avviene una variazione del numero di ossidazione dei reagenti, dovuto ad uno scambio di elettroni. In generale le reazioni di ossidazione e riduzione possono essere riassunte come:



dove il generico elemento A (riducente) si ossida perché perde un elettrone. Questa reazione è chiamata ossidazione e avviene all'anodo della batteria. Mentre nel catodo:



viceversa, in questa reazione l'elemento B (ossidante) si riduce perché acquisisce un elettrone.

Combinando le due, si ottiene la reazione di ossidoriduzione, essa genera una differenza di potenziale tra anodo e catodo pari a  $\Delta E = E_{\text{catodo}} - E_{\text{anodo}}$ . È possibile calcolare a priori  $\Delta E$  conoscendo i materiali con cui è realizzata la batteria. [27]

Da questo punto in poi, verranno usati come sinonimi i termini batteria, accumulatore e cella, in quanto le batterie utilizzate nei veicoli elettrici sono per ovvie ragioni ricaricabili.

#### 2.1.1 Parametri di una batteria

La batteria è un dispositivo complesso i quali parametri spesso non sono costanti ma dipendono dalle condizioni al contorno. Nonostan-

te ciò è possibile elencare dei parametri base che possono essere utilizzati per la caratterizzazione dell'accumulatore [28].

Concetti come lo *State Of Charge (SOC)* e lo *State Of Health (SOH)* verranno trattati in modo più approfondito in seguito.

#### *Potenziale [V]*

Come visto in precedenza è possibile calcolare a priori il potenziale elettrico che avrà una cella, tuttavia il suo valore non è costante e può essere descritto dall'equazione di Nernst. Inoltre il potenziale può variare nel tempo per fenomeni di auto-scarica o di invecchiamento della cella. La tensione nominale è fissata dalla sua composizione chimica che è però soggetta a variazioni di concentrazione nel tempo. Il potenziale reale è minore di quello teorico, questo è dovuto anche all'impedenza e alla resistenza interna della cella che a sua volta varia in funzione della corrente, della temperatura, dallo stato di carica e dallo stato di invecchiamento.

Una cella è caratterizzata da più tensioni. Tra le più significative utilizzate per la caratterizzazione sono: la tensione teorica, a circuito aperto, a circuito chiuso, nominale e di cut-off.

Valori tipici di tensione nominale sono di 1.2 V per le batterie al Ni/Cb e 3.7 V per le batterie Li-ion (ioni di litio).

#### *Capacità [Ah]*

La capacità di una batteria è la misura della quantità di energia elettrica che essa riesce ad immagazzinare, si esprime in Ampere ora (Ah). Analizzando il significato dell'unità di misura, si vede come l'Ah rappresenti la quantità di carica necessaria per erogare un Ampere in un'ora. Essa non viene solo utilizzata per la misura del tempo di scarica, ma anche per stimare il tempo di ricarica (supponendo che la curva di carica sia lineare). Le capacità delle batterie nelle PEV o nelle EV non viene indicata utilizzando l'Ah, ma usando il kWh (multiplo del Wh), calcolato a partire dalla capacità espressa in Ah moltiplicata per la tensione nominale dell'accumulatore.

#### *Densità energetica*

La densità energetica indica la quantità di energia immagazzinata in una cella per unità di volume o di massa (energia specifica), è espressa in Ah/kg o Wh/kg. La densità energetica rappresenta uno dei parametri fondamentali per la caratterizzazione di un accumulatore, è funzione della chimica della batteria e dei processi produttivi utilizzati.

### *Indice C*

La corrente di scarica è spesso espressa con un indice C, al fine di normalizzarla in funzione della capacità della batteria. L'indice C è la misura della velocità con cui una batteria viene scaricata rispetto alla sua capacità massima. Per esempio, se si prende una batteria da 100 Ah, 1C vuol dire che la batteria può essere scaricata in un'ora con una corrente di 100 A. Questo indice può essere fornito anche in forma di multipli o sottomultipli, nel caso fosse 2C vorrà dire che la corrente di scarica si è raddoppiata e quindi il tempo dimezzato.

Nei datasheet delle celle, la corrente viene spesso espressa in funzione del C rate. Per esempio, l'indicazione della massima corrente di scarica è indicata come un multiplo del C rate.

### *Effetto della temperatura*

La velocità delle reazioni chimiche che avvengono all'interno di una cella è direttamente proporzionale alla temperatura, dando luogo a comportamenti diversi al variare delle condizioni ambientali.

Per esempio, se la temperatura è bassa, la mobilità delle cariche è minore e questo comporta una più alta resistenza interna. Se invece la temperatura è troppo elevata, la composizione chimica della cella potrebbe deteriorarsi, comportando una diminuzione della capacità che genera un fenomeno di auto-scarica. È quindi necessario il controllo della temperatura, affinché l'accumulatore possa lavorare il più vicino possibile alle condizioni nominali di funzionamento.

### *Ciclo di vita*

Il ciclo di vita, o vita media di un accumulatore, è definito come il numero di cicli di carica/scarica completi che la batteria può fare, prima che la capacità scenda al di sotto dell'80 % del valore iniziale.

L'accumulatore presenta un degrado progressivo anche se non viene utilizzato. Quindi il produttore nella stima del ciclo di vita, deve considerare anche l'eventuale tempo in cui l'accumulatore rimane immagazzinato, in attesa di essere impiegato.

La durata del ciclo di vita è influenzata da molti altri fattori: come la temperatura, la corrente di carica e scarica, la profondità di carica (stato di carica). Definire il ciclo di vita come il numero di cariche-scariche complete può condurre ad errori grossolani, dal momento che spesso, la batteria viene posta in carica e scollegata prima che raggiunga il valore minimo o massimo, non permettendo un ciclo completo di carica. Questo avviene molto spesso nelle batterie al litio, rendendo necessario un nuovo modo per definire il ciclo di vita. Per far ciò si può usare la definizione di scarica cumulativa, definita come la quantità di totale di carica (Ah) erogata dalla batteria durante la sua vita.

### SOC - State Of Charge

SOC è l'abbreviazione di *State Of Charge* che tradotto significa "stato di carica", rappresenta la capacità disponibile all'interno della batteria ad un certo istante temporale. Un'ambiguità che nasce nella valutazione di questo parametro, è il fatto che nella sua espressione in percentuale, non viene detto se è riferito alla capacità nominale o a quella nell'istante di rilevazione che, a causa dell'invecchiamento, sono diverse.

In dispositivi nei quali il valore del SOC non rappresenta un parametro fondamentale, si preferisce legare la percentuale alla capacità nominale. Mentre in tutte le applicazioni dove conoscere l'esatta capacità della batteria è di fondamentale importanza, si pensi all'autonomia in un veicolo elettrico, il SOC lo si esprime in funzione della capacità reale.

La difficoltà nell'esprimere il vero SOC, è legata al fatto che la capacità non è una costante e varia nel tempo in funzione delle condizioni operative in cui viene impiegata una cella, per esempio la temperatura ambientale di lavoro. È necessario l'utilizzo di opportuni algoritmi che stimino il SOC a partire da misure effettuate direttamente nella batteria, lo studio di quale possa essere il miglior algoritmo per l'identificazione del SOC è tuttora argomento di approfonditi studi. [29]

Tre esempi di metodi di stima dello stato di carica per batterie agli ioni di litio sono:

- **misure dirette:** è il metodo più semplice se la batteria viene scaricata con una corrente costante. Infatti la capacità è data dal prodotto tra la corrente di scarica e la durata di tale processo. Tuttavia la corrente di scarica in una applicazione reale non è mai costante e dipende da come viene utilizzato il dispositivo. In un veicolo elettrico per esempio, durante una fase di accelerazione la corrente che deve essere erogata dalla cella è maggiore rispetto a quella necessaria durante una fase a velocità costante. Una soluzione è quella di implementare un sensore di corrente, metodologia utilizzata nella seconda tecnica;
- **stime basate sulla misura di corrente:** l'energia fornita durante la carica è uguale all'integrale nel tempo della corrente. La capacità della batteria viene calcolata misurando la corrente entrante (carica) o uscente (scarica) e integrandola nel tempo. Fissato come punto di riferimento per la stima, lo stato di batteria completamente carica, il SOC si ottiene a partire dal punto di riferimento a cui si sottrae l'integrale della corrente. Questa tecnica, chiamata *Coulumb Counting*, rappresenta il metodo più affidabile per la stima del SOC. Un campo di ricerca riguarda la scelta del punto di riferimento, dato che anch'esso è funzione dell'invecchiamento;

- **stime basate sulla misura di impedenza interna:** durante i cicli di carica-scarica la composizione chimica della cella varia, facendone variare l'impedenza interna. Attraverso una misura d'impedenza è possibile determinare il SOC. Una problematica associata a questa tecnica consiste nella difficoltà di determinare con precisione il valore della impedenza, dal momento che essendo un valore molto piccolo è facilmente confondibile con rumori presenti nella misura.

Concetti come impedenza interna e SOH *State Of Health* verranno trattati nel successiva capitolo.

## 2.2 BATTERIA AGLI IONI DI LITIO

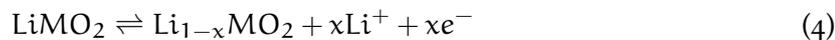
La batteria gli ioni di litio, spesso abbreviata con Li-ion (Lithium-ion) è considerata una delle migliori tipologie di accumulatore. Questo grazie alle ottime caratteristiche tecniche che essa presenta, come una elevata densità energetica, un effetto memoria trascurabile e una bassa velocità di auto scarica.

La prima batteria al litio è stata costruita negli anni '70 da Micheal Stanley Whittingham, usando il litio e il solfuro di titanio come elettrodi. Al giorno d'oggi questa chimica non è utilizzata ma ha dato le basi per lo sviluppo futuro.

Ragguardevoli miglioramenti sono stati ottenuti negli anni '80, da parte di diversi gruppi di ricerca. I loro studi erano incentrati su quali potevano essere i materiali più adatti ad essere utilizzati come catodo. I primi risvolti commerciali si sono avuti nel '91 quando, nella multinazionale giapponese Sony, un gruppo di ricerca diretto da John Bannister Goodenough (a cui è poi valso il premio Nobel per la chimica nel 2019), ha immesso nel mercato il primo dispositivo dotato di una batteria ricaricabile agli ioni di litio. [30]

I quattro componenti principali che compongono una cella agli ioni di litio sono: il catodo, l'anodo, un materiale elettrolita e un separatore. Durante la carica, gli ioni di litio si muovono attraverso l'elettrolita dal catodo all'anodo, compiendo il percorso inverso durante la scarica. Il nome commerciale di batterie Li-ion deriva dagli atomi donatori di ioni di litio presenti nel catodo. Una rappresentazione elementare del principio di funzionamento è riportata in fig. 29.

Le caratteristiche di una Li-ion sono principalmente determinate dal materiale utilizzato per la realizzazione del catodo. Gli ossidi di metallo-litio in polvere utilizzati sono: litio-ossido di cobalto (LCO), litio-ossido di manganese (LMO), litio-ferro-fosfato (LPF), litio-nichel-cobalto-ossido di alluminio (NCA) e litio-nichel-manganese-ossido di cobalto (NMC). La reazione che avviene nel catodo, nel caso di celle LMO, è:



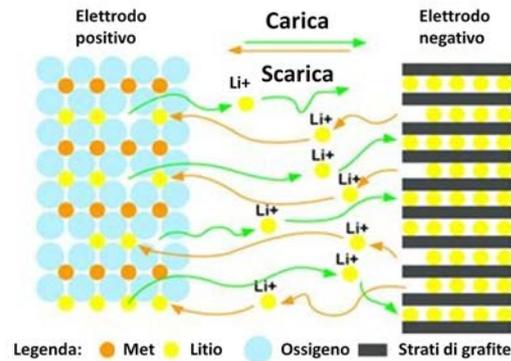
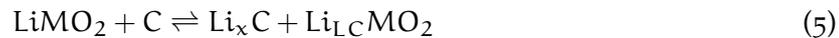


Figura 29: Principio di funzionamento di una batteria agli ioni di litio [27].

Il catodo è composto da un materiale che dipende dalla tipologia di cella, mentre nell'anodo, si trova sempre polvere di grafite. Nell'anodo durante il processo di carica si accumulano ioni di litio, comportandone l'ossidazione.

Negli ultimi anni sono stati compiuti degli studi aventi l'obiettivo di trovare un materiale sostitutivo alla grafite. Si è visto che se si utilizzasse polvere di silicio, si avrebbe un incremento della densità energetica fino ad un 20%, tuttavia al momento questa nuova composizione deve ancora trovare un risvolto commerciale.

La reazione completa in una cella Li-ion è:



L'elettrolita è un insieme di sali di litio ( $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiClO}_4$ ,  $\text{LiAsF}_6$ ) e solventi organici. Quest'ultimi sono fondamentali per incrementare la mobilità degli ioni di litio e rappresentato un fattore chiave per le performance della batteria.

Il separatore è un componente di sicurezza e ha la funzione di evitare il contatto, e quindi il cortocircuito, tra catodo e anodo, allo stesso tempo però deve essere permeabile agli ioni di litio. I materiali più utilizzati per la realizzazione sono il polietilene e polipropilene. Il separatore svolge un ruolo fondamentale nel caso in cui la temperatura della celle cominciasse a salire in modo pericoloso, chiaro segnale di fuga termica o *thermal runaway*. Esso infatti si fonde bloccando il flusso di ioni, questo causa il danneggiamento irreparabile della cella ma evita l'innescio di un principio d'incendio. Nella batteria sono presenti anche ulteriori dispositivi di sicurezza come una struttura meccanica che rafforza la cella, ed evita che corpi esterni possano provocare la rottura dell'involucro, rischiando di cortocircuitare anodo e catodo.

Le batterie Li-ion sono prodotte principalmente in due formati: cilindriche o a pouch. Nella configurazione a pouch il catodo, l'anodo e il separatore sono racchiusi in film laminato che ha la funzione di proteggere la cella. Mentre, nella configurazione cilindrica, i vari elementi sono arrotolati e sigillati in un contenitore metallico. Le due tipologie sono utilizzate per produrre differenti taglie di accumulatori.

Per esempio la forma cilindrica viene utilizzata per la cella di formato 18650, (18 mm di diametro e 65 mm di altezza) di cui se ne discuterà in seguito. È importante specificare che in una cella, il materiale attivo partecipa solo con una piccola percentuale al peso complessivo, tutto il resto è dato dalla struttura meccanica di protezione.

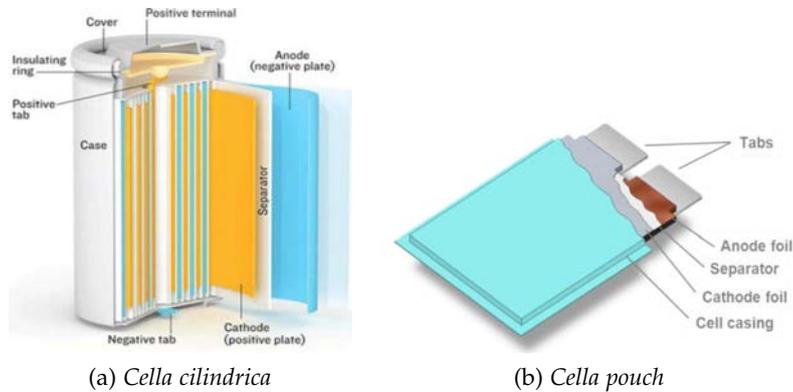


Figura 30: Configurazione delle celle di batterie Li-ion [30].

### Proprietà batterie Li-ion

Le proprietà fondamentali sono: l'energia specifica, la potenza, la durabilità e l'affidabilità.

Le attuali tecnologie per la produzione di celle hanno permesso di raggiungere densità di energia che variano tra 90 e 350 Wh/kg. Da questo punto di vista le celle NCA sono le migliori, mentre le peggiori sono le LPF. Valori tipici di densità di potenza sono nell'ordine di un kW/kg. La potenza dipende dalla densità di ioni di litio, dal materiale di interfaccia, dai coefficienti di diffusione degli elettroni e dalla tensione nominale della cella, che per le batterie agli ioni di litio varia tra 3.6 e 3.7 V.

Un ulteriore aspetto critico è la durabilità. La degradazione della cella può avvenire in qualsiasi condizione ma è fortemente influenzata dall'uso che se ne fa e dalle condizioni operative in cui essa opera, come: temperatura, sovra carica, scarica profonda ed elevate correnti. Il fenomeno dell'invecchiamento è causato da una perdita di litio ciclabile (atomi di litio che possono essere aggiunti o rimossi dagli elettrodi durante il ciclo) e dai materiali attivi che compongono gli elettrodi. La perdita di litio ciclabile è legata alle reazioni interne che si vengono a creare, mentre la perdita di materiale attivo dagli elettrodi è dovuta a fenomeni di degradazione che interessano gli elementi stessi. Il parametro più importante per indicare la durata di una batteria, come già visto in precedenza, è il *ciclo di vita*. [30]

Le curve caratteristiche di carica e scarica delle batterie Li-ion sono riportate in fig. 31. Si osserva come la carica avvenga con una corrente costante fino a quando la cella raggiungono i 4.2 V. Da questo pun-

to in poi la corrente comincia a decrescere esponenzialmente fino ad arrivare a piccole percentuali rispetto al valore iniziale ( $\approx 3\%$ ), comportando la fine della fase di carica. Si noti come il processo di carica duri più di due ore, esso ovviamente dipende dalla capacità della batteria. Tuttavia tempi così lunghi non possono essere compatibili con la mobilità elettrica, infatti nelle stazioni di ricarica rapide, la batteria non viene mai caricata fino al 100% della capacità nominale, ma il processo di carica si arresta all'80%. Osservando la figura si nota come il tempo necessario per raggiungere l'80% è inferiore all'ora.

Nel processo di scarica l'obiettivo della progettazione è quello di mantenere la tensione costante per tutto il periodo, questo assicura la possibilità di erogare una potenza costante indipendentemente dallo stato di carica. Il processo di scarica continua fino a quando la cella raggiunge una tensione prossima a quella di danneggiamento, chiamata *cut-off voltage*, oltre la quale si avrebbe il danneggiamento irreversibile della batteria.

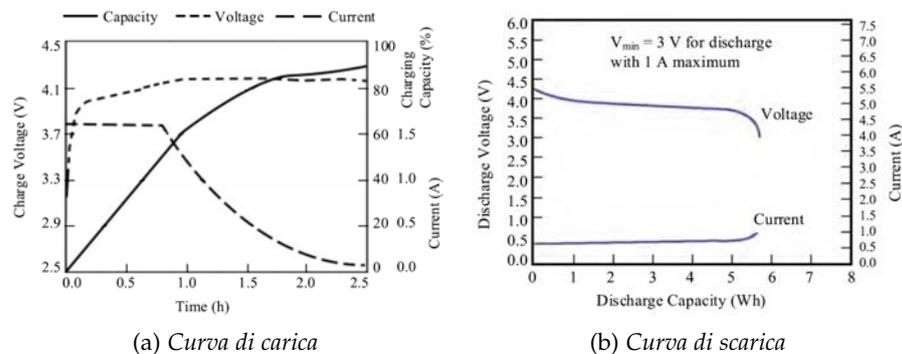


Figura 31: Curve caratteristiche delle batterie Li-ion [27].

### Principali tipologie di batterie Li-ion

Come accennato in precedenza, le batterie agli ioni di litio si differenziano principalmente in base al materiale utilizzato per la realizzazione del catodo. In seguito sono riportate le tipologie più diffuse.[27]

- **Litio-Ossido di Cobalto LCO ( $\text{LiCoO}_2$ )**: è stata la prima batteria agli ioni di litio ad essere commercializzata nel '91. L'elevata densità energetica (150–190 Wh/kg) e la maturità tecnologia raggiunta, la rendono molto utilizzata nei dispositivi elettronici portatili. Ha una vita che varia tra i 500 e i 1000 cicli completi, che tradotti, equivalgono a un paio d'anni di funzionamento, rendendola quindi non compatibile all'utilizzo nelle vetture elettriche. I problemi di questa tipologia di batteria sono legati all'instabilità termica, visto che già a 150 °C comincia il fenomeno della fuga termica e alla presenza di terre rare come il cobalto.

- **Litio-Ossido di Manganese LMO ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ):** commercializzata nel '96. La particolare struttura del catodo favorisce il flusso di ioni comportando una diminuzione della resistenza interna. Essa presenta una durata maggiore rispetto alla LCO, infatti qui si parla di circa 1000-1500 cicli a fronte però di una più bassa densità energetica 100 – 140 Wh/kg, con una temperatura massima di 250 °C. Non utilizzando il cobalto, questa tipologia di batterie è più ecologica e trova ampio utilizzo nelle e-bikes e negli utensili elettrici.
- **Litio-Ferro-Fosfato LMO ( $\text{LiFePO}_4$ ):** introdotta nel '99, presenta una durata fino a 2000 cicli e la possibilità di operare tra il 15 e il 100% della sua capacità. Lo svantaggio principale che ne causa l'impossibilità di essere utilizzata nei veicoli elettrici, è la sua bassa densità energetica che varia tra 80 e 140 Wh/kg.
- **Litio-Nichel-Manganese NMC ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ):** commercializzata nel 2004, possiede una densità energetica compresa tra 140 e 200 Wh/kg e una vita di 1000-2000 cicli. Le performance della batteria possono variare cambiando la concentrazione dei materiali che compongono l'anodo. In particolare, incrementando la percentuale di Nichel si aumenta la densità energetica, mentre incrementando il Manganese si ottiene un aumento della densità di potenza. Questa batteria è una delle due tipologie maggiormente utilizzate nei veicoli elettrici.
- **Litio-Nichel-Cobalto-Ossido di alluminio NCA ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ ):** introdotta nel '99, possiede una energia specifica compresa tra 200 e 250 Wh/kg e una elevata densità di potenza, con una durata di 1000-1500 cicli. Anche se la densità di potenza è più elevata, le NCA vengono utilizzate da poche case automobilistiche, principalmente per il fatto che rispetto alle NCM presentano una durata leggermente inferiore.

L'unica tipologia di batteria trattata fino a questo punto è stata quella agli ioni di litio, questa scelta è dovuta al fatto che negli attuali veicoli elettrici rappresenta l'unica tipologia di accumulatore utilizzato. Per completezza in tab. 15 è contenuta una comparativa tra le varie chimiche di batterie presenti nel mercato, a dimostrazione di come l'accumulatore agli ioni di litio sia il migliore sotto molti punti di vista anche se, non il migliore in assoluto. Si noti per esempio come esso sia la tipologia che più soffre le sovratensioni, per ovviare a questo problema, ci sono dei circuiti di protezione che hanno il compito di mantenere la cella all'interna della SOA (*Safe Operating Area*).

Tipo di Batteria	Lead-acid	Ni-Cd	Ni-MH	Fe-Cr	Li-ion
Densità di energia [Wh/kg]	30-50	45-80	60-120	20-35	110-160
Densità di potenza [W/kg]	180	150	250-1000	70-100	1800
Tensione nominale [V]	2	1.25	1.25	1.18	3.6
Temp. di funzionamento [°C]	-20 - 60	-40 - 60	-20 - 60	-40 - 60	-20 - 60
Durata [cicli]	200-300	1500	300-500	-	500-2000
Toll. sovratensioni	Alta	Moderata	Bassa	Moderata	Molto bassa
Auto-scarica	Bassa	Moderata	Alta	Alta	Molto bassa
Stabilità termica	Moderata	Moderata	Moderata	Stabile	Molto stabile

Tabella 15: Comparazione tra le batterie Li-ion e altre tipologie [27].

### 2.3 CONFIGURAZIONE PACCO BATTERIA

Il pacco batteria rappresenta il cuore in tutti i veicoli elettrici. Esso è formato da tante celle elementari collegate in modo tale da fornire l'energia necessaria affinché il veicolo possa muoversi.

La dimensione e il peso del pacco batteria sono direttamente proporzionale con l'autonomia. In tutti i veicoli progettati fin da subito per essere elettrici, esso viene posizionato al di sotto del pianale. Questo assicura una maggiore rigidità torsionale al telaio e un baricentro basso, permettendo di migliorare le doti dinamiche della vettura. Mentre nelle automobili nate per ospitare un motore a combustione e convertite per motivi commerciali a veicoli elettrici, il pacco batteria viene posizionato al di sotto dei sedili posteriori e nel tunnel centrale.

In fig. 32 è riportato il posizionamento del pacco batterie in due veicoli, in una Tesla Model 3 SR progettata per essere elettrica e in una Volkswagen e-Golf convertita in elettrico. Si noti come nella Tesla il pacco risulti molto più grande a fronte di dimensioni esterne comparabili, infatti nei veicoli nati per essere elettrici, l'autonomia è molto maggiore rispetto a quelli convertiti a posteriori.

In seguito si analizzerà la struttura di un pacco batterie e le scelte progettuali che si possono adottare. In fig. 34 si era già visto due possibili configurazioni di celle, cilindriche e a pouch. Successivamente verranno approfonditi alcuni aspetti e introdotte le celle prismatiche.

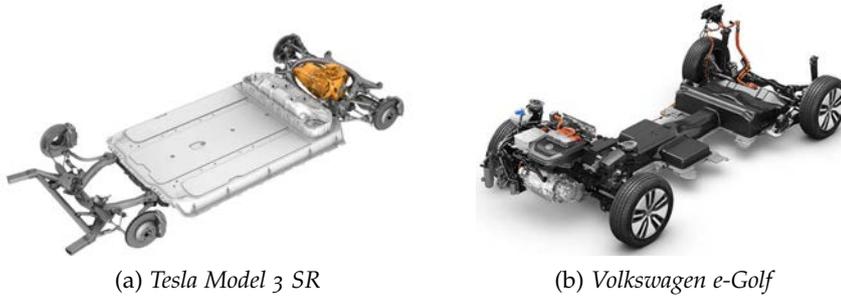


Figura 32: Posizionamento pacco batterie

### Celle cilindriche

Le celle cilindriche rappresentano uno dei formati più utilizzati a livello commerciale per la realizzazione di batterie agli ioni di litio. Possiedono una struttura meccanica che le rende affidabili e possono immagazzinare molta energia in un volume ridotto.

Questa tipologia di cella è usata in molti dispositivi elettrici, dagli utensili meccanici alle autovetture e di conseguenza gli aspetti riguardanti la sicurezza sono di fondamentale importanza. Nella maggior parte delle celle cilindriche è presente una valvola di sicurezza che facilita il rilascio di gas, che potrebbero formarsi all'interno per effetto del thermal runaway.

In fig. 33 è riportato il tappo di sicurezza presente in una cella 18650. Se la pressione dentro alla batteria comincia a salire in modo anomalo, la connessione elettrica tra i terminali di contatto e gli elettrodi viene interrotta, causando il danneggiamento irreversibile della pila ma fermando il thermal runaway. [31]

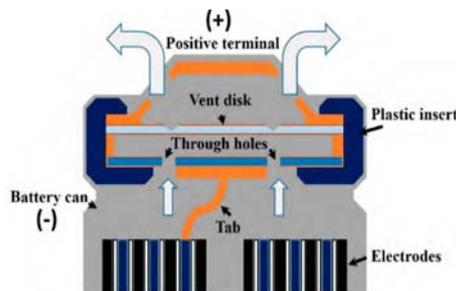


Figura 33: Tappo di sicurezza di una cella 18650 [31].

A livello commerciale sono state definite delle celle di dimensioni standard, le più utilizzate in ambito automotive sono la cella 18650 e la 21700. In tab. 16 è riportato un estratto del datasheet delle due tipologie, esso mostra come la cella 21700 presenti una densità di energia superiore al 15% rispetto alla 18650, il valore della resistenza interna è indicativo dato che dipende dallo stato di carica e dalle metodologie utilizzate per la misura.

Modello	Panasonic NCR18650BD	Panasonic NCR21700A
Tensione nominale	3.6 V	3.6 V
Capacità nominale	3000 mAh	5000 mAh
Tensione di cut-off	2.5 V	2.5 V
Tensione di ricarica	4.2 V	4.2 V
Corrente massima di scarica	10 A	15 A
Resistenza interna	<35 mΩ	12–14 mΩ
Dimensioni	18.35 x 65.1 mm	21.1 x 70.5 mm
Peso	<49 g	70 g
Densità energetica	220 Wh/kg	257 Wh/kg

Tabella 16: Comparativa tra celle cilindriche 18650 e 21700.

Una problematica nell'utilizzare questa tipologia di cella nel pacco batteria, è dovuta al fatto che essendo cilindriche ci sarà sempre dello spazio non occupato e questo fa diminuire lo sfruttamento volumetrico. Tuttavia, lo spazio lasciato libero, può essere utilizzato per far scorrere il liquido refrigerante senza la necessità di costruire appositi condotti.

#### *Celle prismatiche*

Questa tipologia fu introdotta negli anni '90, la cella è contenuta all'interno di involucro rettangolare in metallo, dove gli elettrodi sono impilati oppure disposti come una spirale appiattita. Queste celle vengono progettate in modo da essere molto piatte per trovare impiego anche nei dispositivi elettronici. A differenza delle celle cilindriche, esse presentano dei maggiori costi di produzione, una più difficile gestione termica, minore densità di energia e una maggiore vulnerabilità al rigonfiamento, nel caso si verificasse il thermal runaway. Tuttavia per effetto della loro forma rettangolare, massimizzano l'utilizzo volumetrico e permettono una progettazione più flessibile. Tipicamente possiedono una capacità tra i 20 e 30 Ah. Non esistono dei formati standardizzati e ogni produttore produce la taglia più adatta alle proprie esigenze. [32]

#### *Celle pouch*

Questo particolare formato dal design innovativo è stato presentato nel '95. Invece di utilizzare un cilindro metallico e uno strato di vetro-metallo per l'isolamento, queste celle hanno un involucro completamente sigillato in modo che eventuali gas possano uscire. Attraverso delle linguette in lamina conduttiva, saldate agli elettrodi, portano all'esterno i contatti. Data l'impossibilità dei gas di uscire dall'involucro, per evitare esplosioni, esso è realizzato in un materiale non rigido

permettendo ai gas di espandersi per ridurre la pressione interna, nel caso si verificassero dei malfunzionamenti.

L'utilizzo di questa configurazione permette di ottenere uno sfruttamento volumetrico di circa 90-95%. Data l'elevata compattezza, è molto utilizzata nei dispositivi elettronici e trova impiego anche all'interno dei pacchi batteria. Come avviene anche per le celle prismatiche, le pouch, non hanno dimensioni standardizzate. [32]

#### *Configurazione in serie e in parallelo*

Le specifiche nominali di un pacco batteria non dipendono solamente dal tipo di celle utilizzate ma anche da come esse sono collegate tra di loro. Visto che in base al tipo di collegamento, se serie o parallelo, si ottiene un aumento della tensione o della capacità. In fig. 34 è riportato un esempio di collegamento.

- **connessione in parallelo:** si parla di connessione in parallelo quando tutti i terminali della stessa polarità sono connessi insieme. Teoricamente non esiste un limite al numero di celle che si possono collegare in parallelo, bisogna avere l'accortezza di connettere solo celle aventi la stessa tensione nominale e le stesse caratteristiche. Questa tipologia di collegamento viene realizzata con l'obiettivo di aumentare la capacità del sistema, dato che, in parallelo si sommano le capacità. Permette inoltre di aumentare la corrente erogata;
- **connessione in serie:** si parla di connessione in serie quando si uniscono i terminali positivi e negativi di una o più celle. Questa connessione viene utilizzata per incrementare la tensione nominale dell'accumulatore.

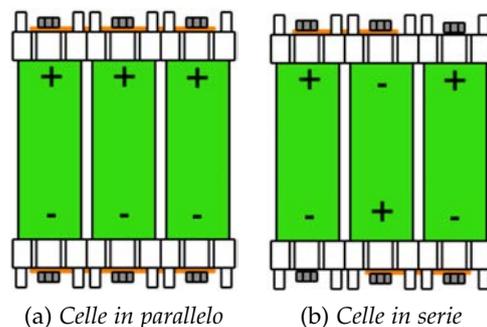


Figura 34: Configurazione celle [33].

#### *Esempi di pacco batteria*

Un pacco batteria è composto da sottoinsiemi comunemente chiamati moduli e gruppi, all'interno dei quali sono contenute un numero

variabile di celle. Questa suddivisione permette di utilizzare il medesimo pacco batterie per più allestimenti dello stesso veicolo. La diversa capacità della batteria è ottenuta variando la disposizione e il numero di moduli e gruppi.

In seguito si sono analizzate tre configurazioni di pacco batteria di veicoli elettrici disponibili nel mercato.

- **Tesla Model 3:** il pacco batteria nella versione da 75 kWh ha una massa di 480 kg compreso l'involucro. Esso è composto da 4416 celle cilindriche 21700 prodotte da Panasonic in esclusiva per Tesla. Ogni cella ha una tensione nominale di 3.65 V, una capacità di 17.3 Wh e una massa di 70 g. All'interno del pacco batterie si trovano 4 moduli connessi in serie, due dei quali contengono 25 gruppi e i restanti 23 gruppi tutti in serie tra di loro. All'interno di ogni gruppo sono contenute 46 celle connesse in parallelo, questo permette di avere una tensione nominale di 350 V e una capacità di 76.4 kWh;
- **Tesla Model S:** l'allestimento più prestazionale è quello che dispone di un pacco batteria di 100 kWh con una massa di 625 kg. Le celle cilindriche utilizzate sono delle Panasonic 18650 con una tensione nominale di 3.6 V, una capacità di 10.8 Wh e una massa di 45 g. In questo caso sono presenti 16 moduli in serie ognuno dei quali contiene 6 gruppi a loro volta in serie nei quali trovano posto 86 celle in parallelo, per un totale di 8256 celle. In questa configurazione si ottiene una tensione nominale di 350 V e una capacità di 102.4 kWh;
- **Audi E-tron:** la versione da 95 kWh è dotata di celle pouch prodotte da Lg Chem di cui le specifiche non sono pubbliche dal momento che sono realizzate in esclusiva per Audi. Il pacco batteria ha una massa di 700 kg ed è composto da 36 moduli all'interno dei quali sono contenute 12 celle, aventi una capacità di 216 Wh per un totale di 93.3 kWh.

#### 2.4 BMS (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM)

Al fine di proteggere le singole celle che compongono il pacco batteria, e quindi l'intero sistema di accumulo da reazioni esotermiche che lo andrebbero a danneggiare, è necessario utilizzare un sistema di gestione delle batterie, il BMS *Battery Management System*. La funzione più importante svolta dal BMS è fare in modo tale che le celle non operino al di fuori dei loro limiti in termini di tensione, temperatura e corrente. Le celle devono lavorare sempre all'interno della loro SOA *Safe Operating Area*.

Il BMS è un dispositivo analogico o digitale presente in tutti i sistemi dotati di batterie ricaricabili, le funzioni primarie che esso opera sono [34]:

- acquisizione di dati;
- elaborazione e salvataggio di dati;
- gestione elettrica;
- gestione della temperatura;
- rispetto delle norme di sicurezza;
- comunicazione.

Per un veicolo elettrico il BMS deve [34]:

- incrementare la sicurezza e ottimizzare il funzionamento del pacco batteria;
- proteggere le singole celle e il pacco batteria dal danneggiamento;
- incrementare l'efficienza del sistema al fine di aumentare l'autonomia;
- prolungare la vita utile delle celle.

#### *Misura di temperatura*

Conoscere in modo esatto la temperatura del pacco batteria è di fondamentale importanza per il corretto funzionamento dell'autoveicolo e rappresenta anche una delle sfide più difficili nella progettazione di un BMS. Le performance di una batteria agli ioni di litio sono legate alla sua temperatura. Per questo motivo non è sufficiente disporre della sola temperatura media del pacco batteria ma è necessario conoscere quella di ogni cella. Le simulazioni mostrano che è necessario trovare il numero, e il posizionamento, ottimo dei sensori. Il rapporto tra il numero di sensori di temperatura e il numero di celle, viene scelto variabile tra 2:3 fino a 2:12, nel primo caso per esempio, sono presenti due sensori di temperatura ogni tre celle.

In un pacco batteria è importante conoscere anche la temperatura dei conduttori, in genere realizzati in rame. Essi permettono la connessione dei terminali del pacco batteria ai morsetti dell'inverter. [35]

#### *Misura di tensione*

Un classico BMS utilizzato per il controllo delle batterie agli ioni di litio, deve disporre di almeno una misura di tensione per ogni gruppo di celle disposte in serie. Tuttavia è molto spesso presente un secondo canale di acquisizione con una accuratezza inferiore a

quello primario, ma utilizzato al verificarsi di malfunzionamenti del principale.

La frequenza di acquisizione dei dati dipende dall'applicazione in cui il BMS opera. È possibile raggiungere frequenze anche superiori al kHz, tuttavia, essendo la costante di tempo di una cella superiore al ms, frequenze così elevate non vengono utilizzate a meno che non siano presenti variazioni a gradino delle correnti. Il sovracampionamento è utile quando la tensione della batteria viene usata per la stima del SOC in algoritmi di stima basati sulla chimica della cella, come quello basato sulla misura della tensione a circuito aperto (*Open Circuit Voltage*, OCV).

I sensori di tensione, attualmente disponibili nel mercato, hanno una sensibilità inferiore al mV con un numero di bit variabile tra 12 e 16. [35]

#### *Misura di corrente*

Come in precedenza trattato, uno dei metodi principali per la stima del SOC è il *Coulomb Counting*, basato sulla misura di corrente.

Esistono vari metodi con cui realizzare la misura della correnti. Tra i più utilizzati si trovano quelli basati su sensori ad effetto Hall, che richiedono un apposito hardware; e i metodi basati sulla resistenza di Shunt dotati di una minore precisione rispetto ai precedenti, ma costo più basso.

Spesso i sensori utilizzati devono essere in grado di rilevare variazioni di corrente da pochi mA fino anche a migliaia di A, possedere una elevata banda passante ed essere immuni a disturbi elettromagnetici.

Data la fondamentale importanza della misura di corrente e i problemi implementativi che si devono affrontare, molto spesso nella stima del SOC vengono usati algoritmi predittivi che, utilizzando una predizione basata sul modello, migliorano la stima rispetto a quella ottenuta dalle sole misure. [35]

#### *Comunicazione*

Il BMS ha la necessità di comunicare con gli altri componenti dell'autoveicolo e con le infrastrutture esterne come le colonnine di ricarica, per determinare i parametri con cui deve avvenire il processo di carica.

Come si vedrà in seguito, un BMS è una struttura modulare distribuita in vari punti dell'autoveicolo, per motivi legati alla posizione in cui vengono fatte le misure. Per esempio, nei pacchi batterie è presente un circuito integrato che si occupa delle misure di tensione, che comunica con il BMS centrale. Storicamente il protocollo utilizzato per la comunicazione tra i vari moduli è il CAN-bus, tuttavia negli

ultimi anni il protocollo Ethernet sta trovando impiego in quanto permette di ottenere maggiori velocità, con un numero inferiore di cavi. [35]

### *Ridondanza*

Per ridondanza si intende la presenza di due o più dispositivi, progettati per eseguire la stessa funzione, in modo tale che anche se si dovessero verificare dei malfunzionamenti, è presente un secondo dispositivo che sostituisce quello danneggiato.

La ridondanza, gli auto-test, il monitoraggio dell'alimentazione e ai timer watchdog sono dei sistemi che aumentano l'affidabilità del sistema e la loro presenza è a volte resa obbligatoria dallo standard ISO 26262.

Non tutti i sistemi vengono progettati per permettere un elevato grado di ridondanza perché questo ne fa aumentare i costi e la complessità del sistema. Un esempio di sistema ridondante è quello descritto in precedenza nella misura di tensione. [35]

#### 2.4.1 *Tipologie di BMS*

I componenti di un BMS possono essere suddivisi in tre categorie [34]:

- **CMU *Cell Monitoring Unit***: rappresenta il livello più basso del BMS. Consiste in un'unità associata ad ogni cella o a un gruppo con i rapporti visti in precedenza (2:3, 2:12). Il CMU misura la temperatura, la tensione e la corrente e fornisce ulteriori parametri caratteristici della cella, provvede inoltre al bilanciamento della stessa;
- **MMU *Module Management Unit***: livello intermedio. Gestisce e controlla tra le 8 e le 12 CMU. L'insieme dei MMU provvede al bilanciamento dell'intero pacco batteria;
- **PMU *Pack management unit***: livello alto. Controlla le MMU e comunica con i sistemi esterni, misura la tensione e la corrente dell'intero pacco batterie.

I termini CMU, MMU e PMU non sono standardizzati e possono venire utilizzati anche altri acronimi. Per esempio *central management unit* viene utilizzata al posto di PMU, *data acquisition unit* per CMU e *cell supervisor circuit* sostituisce MMU.

### *BMS centralizzato*

In un BMS centralizzato i tre livelli CMU, MMU e PMU sono combinanti in un singolo dispositivo realizzato in un circuito stampato, una rappresentazione schematica è riportata in fig. 35.

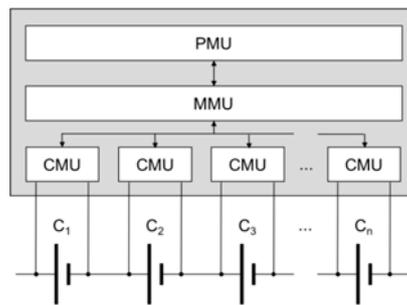


Figura 35: BMS centralizzato [34].

Questa tipologia di BMS è semplice, compatto e poco costoso. Nei casi in cui il pacco batterie sia composto da un elevato numero di celle, i cavi che partono dal BMS sono a loro volta numerosi e questo fa aumentare la difficoltà di cablaggio e rende difficoltosa l'eventuale manutenzione. Un'ulteriore problema presente in questo BMS è dovuto al fatto che nella stessa scheda sono presenti le tensioni di una singola cella ma anche quella totale del pacco batterie, rendendo quindi necessario un attento isolamento galvanico.

Per le ragioni sopra scritte questa tipologia di BMS viene utilizzato in sistemi che dispongono di un basso numero di celle, come le e-bikes.

#### *BMS Master-Slave modulare*

In un BMS modulare sono presenti più MMU alloggiati in prossimità dei gruppi di celle, in modo da ridurre la lunghezza dei cablaggi, come rappresentato in fig. 36.

Il master è rappresentato dal PMU e gli slave sono i MMU. Il costo degli slave è ridotto dato che tutte le funzioni principali sono svolte dal master. La comunicazione tra i moduli è realizzata con il protocollo CAN-bus o Ethernet.

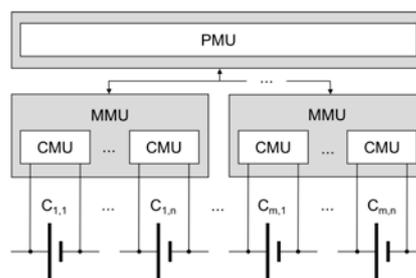


Figura 36: BMS master-slave modulare [34].

#### *BMS distribuito*

In un BMS distribuito ci sono più unità PMU le quali supervisionano un insieme di celle, la struttura si ottiene affiancando varie unità ele-

mentari uguali a quella di fig. 36. Le PMU possono lavorare in modo autonomo o comunicare tra di loro in funzione del lavoro da svolgere.

Questa tipologia offre una elevata flessibilità e scalabilità a fronte di costi e di una complessità più elevate rispetto alle precedenti architetture.

L'architettura solitamente utilizzata nei autoveicoli elettrici è quella modulare perché offre buone prestazioni pur mantenendo contenuto il costo.

#### 2.4.2 Bilanciamento

Una delle funzioni più importanti svolte dal BMS per preservare lo stato di salute del pacco batterie è quella di bilanciare le tensioni delle celle.

Lo sbilanciamento nasce dal fatto che non tutte le celle sono uguali tra di loro anche se fornite dallo stesso produttore e facenti parte del medesimo lotto di produzione, dal momento che possono esserci sempre leggere differenze nel processo produttivo. Lo sbilanciamento può essere dovuto anche ad un carico di lavoro che non si distribuisce in modo equo nel pacco batterie. Per esempio può esserci un modulo che eroga una corrente maggiore rispetto a quello adiacente, comportando così una tensione più elevata in quest'ultimo. [36]

In letteratura esistono due tipologie di tecniche per il bilanciamento. La prima è detta bilanciamento passivo ed è basata sulla dissipazione della carica in eccesso da quelle celle che presentano una più elevata tensione. La seconda è detta bilanciamento attivo e consiste nell'utilizzo di elementi non dissipativi, che permettono il trasferimento di carica tra le celle più cariche a quelle meno. [36]

In seguito sono riportati alcuni esempi di circuiti di bilanciamento.

##### *Bilanciamento passivo: Rete resistiva*

Questa tecnica di bilanciamento passivo sfrutta una rete resistiva composta da resistenze di Shunt poste in parallelo alle celle. Viene utilizzata per il bilanciamento solo durante il processo di carica essendo basata sulla dissipazione di energia. Lo schematico è riportato in fig. 37.

È possibile implementare due tecniche di controllo. La prima in cui tutti gli interruttori sono attivi durante il processo di carica, in modo tale che, se una cella presenta una tensione più elevata rispetto alle altre, la corrente fluisce nella resistenza invece che caricare la cella. Così facendo, si ottiene il bilanciamento del pacco batterie a patto che le resistenze di Shunt siano tutte uguali tra di loro. Il secondo metodo di controllo si basa sulla misura delle tensioni di ciascuna cella e, in funzione della tensione rilevata, si attiva o meno l'interruttore per la dissipazione della carica in eccesso. [37]

Il difetto principale di questo metodo, motivo per cui non viene utilizzato, è il fatto che essendo basato sull'utilizzo di resistenze, comporta una dissipazione di energia e quindi una bassa efficienza.

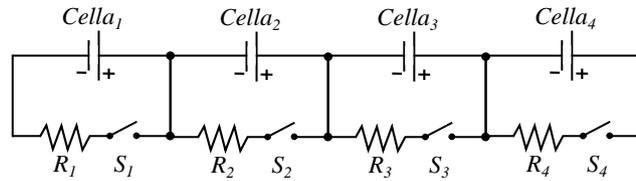


Figura 37: Bilanciamento passivo con rete resistiva [37].

#### *Bilanciamento attivo: Rete capacitiva*

In questa tecnica di bilanciamento attiva, le resistenze del metodo precedente sono state sostituite da dei condensatori. Il circuito è riportato in fig. 38.

L'idea alla base del funzionamento, è quella di bilanciare le tensioni di due celle adiacenti connettendo un condensatore comune posto in parallelo. È un bilanciamento attivo perché a differenza del caso precedente, la carica in eccesso viene immagazzinata nel condensatore e quando poi l'interruttore cambia posizione, essa viene rilasciata alla cella più scarica.

In questa tecnica non è necessario l'utilizzo di sensori per la misura delle tensioni e neppure sofisticate logiche di controllo. Questo metodo è chiamato bilanciamento automatico perché non è necessario nessun algoritmo di controllo. Lo svantaggio principale è dovuto al tempo necessario per il bilanciamento dato che cresce all'aumentare del numero di celle connesse in serie e permette, il solo trasferimento di energia tra celle adiacenti. In letteratura è presente una variante del circuito di fig. 38 la quale permette anche il trasferimento di energia tra celle non adiacenti.

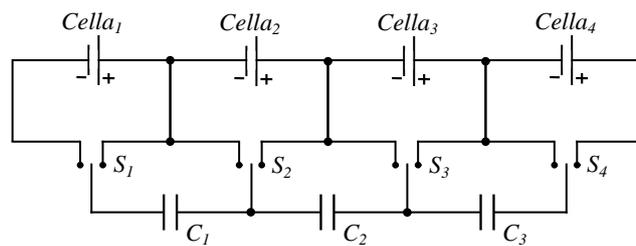


Figura 38: Bilanciamento attivo con rete capacitiva [37].

#### *Bilanciamento attivo: Rete di convertitori*

Un ulteriore approccio per ottenere il bilanciamento delle celle è quello di controllare l'energia che ogni cella eroga al carico. In questa tipologia non viene dissipata potenza e neppure viene trasferita tra le

celle, i convertitori che meglio si prestano ad essere utilizzati sono i multilivello.

Una possibile configurazione è riportata in fig. 39, dove ad ogni cella, è associato un convertitore. La corrente erogata da ogni batteria può essere controllata in funzione del SOC, ottenendo così il bilanciamento delle tensioni.

Il vantaggio ottenuto con questa tipologia di bilanciamento attivo è l'alta flessibilità introdotta dall'utilizzo di un singolo convertitori per ogni cella. Questo permette la gestione del flusso di corrente in modo ottimale, tuttavia i costi di tale tecnologia sono elevati.

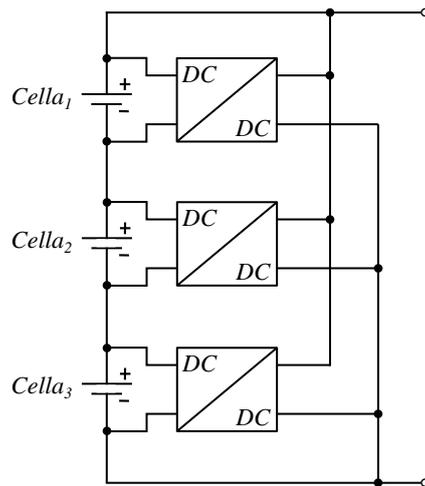


Figura 39: Bilanciamento attivo con una rete di convertitori [37].



## STIMA DELL'INVECCHIAMENTO DELL'ACCUMULATORE

---

### 3.1 SOH - STATE OF HEALTH

Lo *State of Health* o stato di salute spesso abbreviato con SOH è il parametro da valutare nel caso in cui si vogliono stimare le condizioni in cui si trova l'accumulatore. La conoscenza del SOH, e quindi della degradazione della batteria, può essere sfruttata per programmare la manutenzione, evitando così che il degrado raggiunga livelli tali da compromettere il funzionamento del veicolo.

Non esistendo una formulazione esatta del SOH, spesso viene indicato come un rapporto tra la capacità reale della batteria ad un certo numero di cicli e quella iniziale. Quindi:

$$\text{SOH} = \frac{C_a}{C_n} \cdot 100 \quad (6)$$

dove  $C_a$  indica la capacità attuale della batteria mentre  $C_n$  la capacità nominale o quella determinata con opportune misurazioni quando l'accumulatore è nuovo. Il tutto viene moltiplicato per 100 perché è usuale rappresentare il SOH in percentuale.

Tuttavia, al momento oltre a non esistere una definizione precisa di cos'è il SOH non è ben chiaro neppure come esso possa essere determinato. Infatti la (6), rappresenta il solo concetto teorico e a livello sperimentale non viene usata dato che presenta problemi implementativi.

Convenzionalmente si assume un SOH del 100% per indicare un accumulatore nuovo, mentre al raggiungimento dell'80% della capacità iniziale, lo si può considerare a fine vita. In questi ultimi anni la percentuale alla quale si assume l'accumulatore a fine vita, si sta spostando verso il basso. Merito del miglioramento della tecnologia con la quale si realizzano gli accumulatori.

Il problema maggioritario nella definizione del SOH è dovuto al fatto che le batterie agli ioni di litio sono dei sistemi elettrochimici molto complessi e il processo che provoca l'invecchiamento è difficile da analizzare in modo analitico.

I meccanismi di invecchiamento che avvengono nell'anodo e nel catodo sono differenti. Il maggior contributo all'invecchiamento è nell'anodo ed è causato dalla formazione di una interfaccia solida nell'elettrolitica (*SEI Solid Electrolyte Interface*), che causa un significativo aumento dell'impedenza. L'interfaccia solida che si viene a formare è costituita da del metallo di litio che si deposita sull'anodo occupando

i siti normalmente destinati al carbonio. Questo causa una diminuzione della capacità e una perdita di litio ciclabile oltre che un aumento dell'impedenza. In letteratura l'interfaccia solida viene chiamata *lithium metal plating*.

La formazione di questa strato sull'anodo avviene più rapidamente quando si effettuano delle ricariche a bassa temperatura ( $<0^{\circ}\text{C}$ ) o con elevate correnti.

In generale i fenomeni che causano l'invecchiamento di una cella e quindi la perdita di capacità, sono i cambiamenti strutturali e le reazioni chimiche che provocano variazioni della composizione chimica. Nella realtà, l'aumento dell'impedenza delle celle e quindi la diminuzione del litio ciclabile, non avviene solo per mezzo di naturali fenomeni di invecchiamento, ma può succedere anche a causa di eventi accidentali come shock meccanici, che provocano la perdita di contatto tra gli elettrodi e i materiali attivi. L'insieme di questi aspetti aiuta a capire come la stima del SOH sia molto difficoltosa, ancora oggetto di approfonditi studi. [38]

### 3.2 ANALISI DEI PARAMETRI CHE INFLUENZANO L'INVECCHIAMENTO

In [39] sono state analizzate come le condizioni al contorno (temperatura, SOC e corrente di scarica), possono influenzare il SOH. I test sono stati svolti con delle celle cilindriche NMC 18650 di Sony, aventi una capacità nominale di 2.5 Ah, determinata attraverso una prova di scarica con corrente costante pari a 0.2C in un range di tensioni comprese tra 4.2 V e 2.5 V.

Per valutare l'effetto delle condizioni al contorno sono stati svolti diversi test di invecchiamento, usando le condizioni riportate in tab. 17. I valori contenuti nella tabella si riferiscono al SOC medio con cui è stato eseguita la prova, DOD è l'acronimo di *Depth Of Charge* cioè il complementare del SOC, mentre CxDy si riferisce al C-rate utilizzato durante la carica e la scarica.

Per esempio *DOD: 25, T = 20 °C, C1D2, SOC:50* indica un test svolto ad una temperatura di  $T = 20^{\circ}\text{C}$  con una velocità di carica pari a 1C e di scarica 2C, con un SOC variabile tra il 37.5% e il 62.5%.

Un ciclo completo è composto da:

- una fase di carica a corrente costante (CC, *Costant Current*) a 1C seguita da una fase a tensione costante (CV, *Costant Voltage*), fino a quando la corrente è pari a 0.05C;
- pausa di 5 minuti;
- scarica a corrente costante fino al DOD prestabilito;
- pausa di 5 minuti.

DOD %	SOC %					
	T = 0 °C		T = 20 °C		T = 45 °C	
	C1D1	C1D2	C1D1	C1D2	C1D1	C1D2
25	-	-	50	50	-	-
50	50	50	25/50/75	50	50	50
60/80/90	-	-	50	-	-	-
75	-	-	50	50	-	-
100	50	50	50	50	50	50

Tabella 17: Valori medi del SOC utilizzati per il test di invecchiamento [39].

Questa sequenza viene ripetuta fino a quando si sono ottenuti 100 cicli completi, dove un ciclo completo indicata la carica e la scarica completa (EFC, *Equivalent Full Cycle*). Al raggiungimento dell'obiettivo vengono effettuate le misure di capacità per determinare lo stato della cella.

Al termine delle prove sperimentali si ottiene fig. 40 dove è riportato l'andamento della capacità in funzione del numero di cicli. Com'è lecito aspettarsi, si vede come la progressiva perdita di capacità è fortemente dipendente dalle condizioni al contorno.

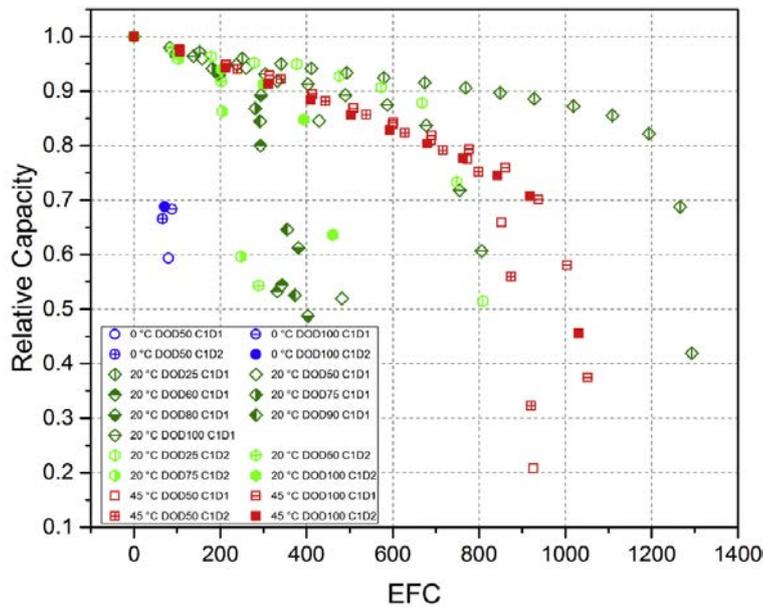


Figura 40: Andamento della capacità al variare del numero di cicli [39].

#### *Effetto della temperatura*

In fig. 40 si vede chiaramente come la temperatura giochi un ruolo fondamentale nell'invecchiamento della cella. I test effettuati a 0 °C mostrano che già dopo 100 EFC la capacità è pari al 70% del valore

iniziale, mentre a parità di EFC, si ha una diminuzione minore se il processo di invecchiamento viene eseguito a 20 °C o a 45 °C.

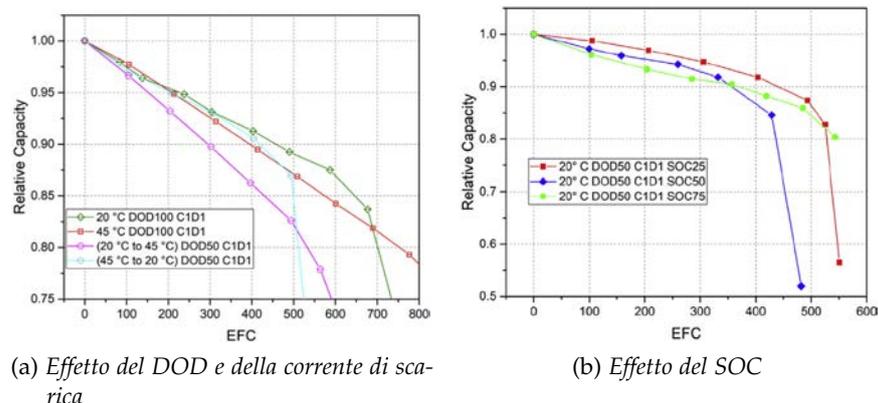


Figura 41: Diminuzione della capacità per effetto della temperatura [39].

### *Effetto del DOD*

Da fig. 40 si nota come per valori di DOD del 25 % e temperatura di 20 °C. la cella presenti un invecchiamento molto più lento e graduale, permettendo di avere un ciclo di vita più elevato. La diminuzione di capacità per le celle che lavorano con un DOD del 50 %-90 % è significativamente maggiore. Tuttavia per meglio capire quale sia il motivo legato a questo comportamento, è necessario studiare con accortezza come si forma il SEI e questo è possibile utilizzando una tecnica chiamata "spettroscopia", che verrà introdotta in seguito.

### *Effetto della corrente di scarica*

L'invecchiamento della cella è inoltre funzione della corrente di scarica. Si nota da fig. 40 come all'aumentare della corrente, l'aspettativa di vita diminuisca anche se la temperatura rimane la medesima, 20 °C. Questo fenomeno, tipico delle batterie al litio, avviene in quanto una elevata corrente richiede che le reazioni chimiche debbano avvenire più velocemente, generando uno stress meccanico più importante che porta alla creazione di crepe e fessure creando un aumento dello spessore del SEI. Questo fenomeno è meno presente a temperature più elevate. Si nota infatti che per una temperatura di 45 °C, a parità di condizioni al contorno, l'aspettativa di vita sia maggiore. Questo si verifica in quanto un aumento di temperatura è associato ad una maggiore mobilità degli ioni e quindi a delle reazioni più veloci.

### *Effetto del SOC*

Da fig. 41(b) si vede come anche il SOC giochi un ruolo fondamentale nell'invecchiamento della cella. Le tre curve presentano un andamento lineare fino a circa 400 EFC, per poi avere una drastica perdita di capacità all'aumentare del numero di cicli. Le prestazioni migliori si ottengono per un SOC del 75 %, poiché avendo la cella una tensione a circuito aperto più elevata (OCV, *Open Circuit Voltage*), le cariche hanno una più alta energia, e di conseguenza una maggiore mobilità atomica, che ritarda la formazione del SEI.

#### 3.2.1 *Tecniche per ritardare l'invecchiamento*

Si è dunque osservato come, se si presta attenzione alle condizioni al contorno, è possibile aumentare la vita utile della cella. Nei veicoli elettrici una serie di accorgimenti viene attuata per ritardare l'invecchiamento e quindi aumentare il numero di cicli utili dell'accumulatore.

In precedenza si è osservato come la temperatura sia molto importante, per questo motivo all'interno del pacco batteria è presente un liquido che ha la funzione di mantenerlo sempre ad una temperatura prefissata.

Osservando come elevate correnti siano meno pericolose quando la temperatura è maggiore, nei veicoli elettrici più avanzati è presente una funzione di preriscaldamento della batteria che viene attivata prima di ricaricare in DC con alte potenze. Questa funzione gioca due ruoli fondamentali: da una parte permette di diminuire i tempi di ricarica dal momento che è possibile erogare fin da subito elevate correnti, dall'altra permette un aumento della vita utile delle celle.

Inoltre è sempre consigliato mantenere la carica della batteria tra un 20 % e un 90 %.

### 3.3 TECNICHE DI STIMA DELL'INVECCHIAMENTO

Grazie al diffondersi di accumulatori agli ioni di litio, gli studi fatti nella ricerca di tecniche che permettano di stimare in modo ottimo il SOH sono aumentati. In generale esistono due tipi di approcci: quelli basati su tecniche sperimentali e quelli, che sfruttando la conoscenza del modello della batteria, stimato o ricavato sperimentalmente, utilizzando algoritmi di stima.

Nelle tecniche sperimentali la stima del SOH viene realizzata misurando i parametri della batteria come la capacità o l'impedenza. Nella misura della capacità si utilizza il metodo della tensione a circuito aperto o il metodo di Coulomb precedentemente introdotto, mentre nella misura dell'impedenza viene di solito utilizzata la spettroscopia elettrochimica. Queste tecniche richiedono una bassa potenza compu-

tazionale dal momento che si misurano delle tensioni e delle correnti, ma di contro, è necessario l'utilizzo di strumentazione specifica data l'elevata precisione richiesta. [40]

Nei metodi adattivi, cioè che sfruttano la conoscenza del modello della batteria, il valore del SOH viene determinato attraverso la stima di quei parametri che più sono soggetti al fenomeno dell'invecchiamento. Queste tecniche hanno un'ottima accuratezza nella stima e permettono una facile intercambiabilità anche tra batterie che presentano chimiche differenti. [38]

Verranno in seguito riportati due esempi di tecniche che possono essere utilizzate per la stima dell'invecchiamento. Nella prima si utilizza un metodo adattivo basato sull'utilizzo di una rete neurale; mentre nella seconda, si sfrutteranno i profili di carica per effettuare una misura di capacità con la quale determinare il SOH.

Sarà introdotta infine la spettroscopia d'impedenza.

### 3.3.1 Stima del SOH con rete neurale

In [41] è presentata una tecnica basata sull'utilizzo di una rete neurale. La fase di apprendimento è realizzata utilizzando parametri come tensione, corrente e temperatura che vengono forniti per uno specifico valore del SOH.

La tipologia di rete neurale utilizzata è basata sul *Multilayer Perceptron* (MLP) ed è composta da strati multipli di nodi in un grafo diretto con ogni strato completamente connesso al successivo. Ad eccezione dei nodi in ingresso, ogni nodo è un neurone con una funzione di attivazione non lineare, scelta in base al compito che la rete neurale dovrà svolgere. Nel caso in esame la funzione di attivazione utilizzata è la *Rectified Linear Unit* (ReLU).

L'apprendimento della rete neurale è stato realizzato fornendo 5 pattern di dati, ognuno relativo ad uno specifico stato di salute della batteria. In fig. 42 è riportato lo schema della rete neurale e i vettori di dati in ingresso e uscita utilizzati durante la fase di apprendimento.

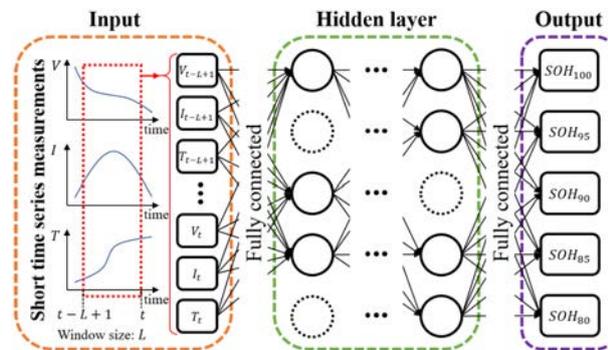


Figura 42: Schema della rete neurale MLP [41].

Le fase di apprendimento e le prove sperimentali dell'algoritmo sono state eseguite utilizzando una cella cilindrica 18650 NMC, con una capacità iniziale di 2000 mAh a 25 °C e con una tensione nominale di 3.6 V. La fase di apprendimento è stata realizzata in due condizioni. Nella prima prova i dati in tensione e corrente sono stati ricavati da test di laboratorio in cui la cella è stata caricata e scaricata utilizzando specifici profili di carica/scarica e le misure ricavate sono state associate ad un preciso SOH, determinato attraverso una misura di capacità realizzata durante una carica con corrente di C/25. La seconda prova è stata effettuata con l'obiettivo di implementare l'algoritmo nel funzionamento online, è stato ricavato un profilo di velocità generico per un veicolo e da questo determinata la richiesta di potenza che la cella deve erogare, per determinare in seguito il corrispondente profilo di corrente. A partire da questo e utilizzando Matlab, sono stati ricavati i profili di fig. 43 che indicano l'andamento delle grandezze usate per l'apprendimento, al variare dello stato di salute.

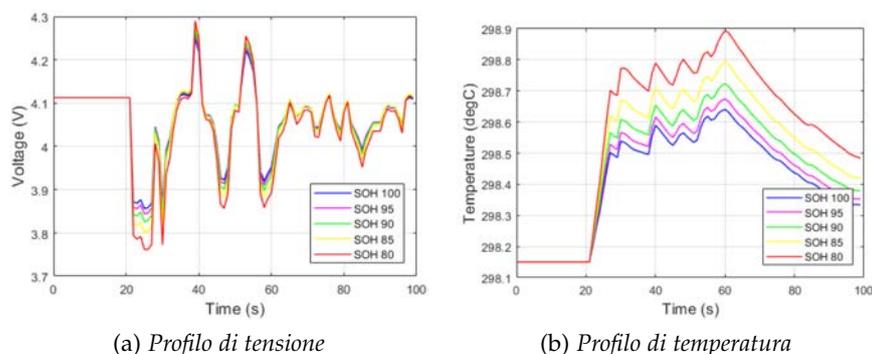


Figura 43: Profili utilizzati per l'addestramento della rete neurale [41].

Dai profili di fig. 43 sono stati trovati gli intervalli di dati da utilizzare per l'apprendimento. In particolare sono stati scelti per ogni stato di salute 3 intervalli da 180 campioni nel caso della prima prova e 5 intervalli da 180 punti nella seconda.

Completata la fase di apprendimento l'algoritmo è stato utilizzato per determinare il SOH durante il funzionamento online. Sono stati forniti come input dei profili di tensione, corrente e temperatura differenti rispetto a quelli utilizzati precedentemente, per verificare il corretto funzionamento dell'algoritmo. Nella prima prova si è registrato un errore medio di 1.6% e massimo di 3.8%, mentre nella seconda l'errore registrato è stato rispettivamente di 0.49% e 1.87%.

Gli errori medi ottenuti indicano come questa tecnica si presti molto bene ad essere utilizzata per la stima online del SOH, dal momento che, una volta completata la fase di apprendimento, l'algoritmo può essere facilmente implementato all'interno del BMS dato che la potenza computazionale richiesta non è elevata. Il problema principale in questo algoritmo è tipico delle reti neurali, funzionano molto bene all'interno dell'intervallo di valori per i quali è stato eseguito

l'apprendimento, ma il corretto funzionamento non è assicurato nel caso in cui il vettore degli ingressi si trovi al di fuori della regione di apprendimento.

### 3.3.2 Stima del SOH attraverso una stima della capacità

In [42] viene descritta una tecnica basata sulle misure dirette, dove attraverso un'opportuna analisi dei profili di carica, viene stimata la capacità reale utilizzando la (6) e in seguito, determinato lo stato di salute.

In questa tecnica un algoritmo *Non Dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA) viene utilizzato per scegliere al meglio l'intervallo del profilo di carica in tensione da utilizzare per la stima della capacità.

Ricordando come il SOC possa essere definito come:

$$\text{SOC} = \frac{Q_b}{Q_{\text{disponibile}}} \times 100\% \quad (7)$$

dove  $Q_b$  è l'energia contenuta nella batteria e  $Q_{\text{disponibile}}$  la massima energia che può essere immagazzinata.

La formulazione di Coulumb può essere utilizzata per determinare il SOC; si determina quindi:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(0) + \frac{1}{Q_{\text{disponibile}}} \cdot \int_0^t \eta \cdot I(t) dt \quad (8)$$

dove  $\text{SOC}(0)$  è il SOC all'istante iniziale e  $\text{SOC}(t)$  quello all'istante  $t$ ,  $\eta$  è il coefficiente di Coulumb (in genere unitario) e  $I(t)$  è la corrente che se positiva ricarica la batteria, viceversa se fosse negativa.

Rielaborando e discretizzando la (7) si ottiene:

$$Q_{\text{disponibile}} = \frac{\sum_{k=A_1}^{A_2} \eta \cdot I(k) \cdot T_s}{\text{SOC}(A_2) - \text{SOC}(A_1)} \quad (9)$$

dove  $T_s$  è il periodo di campionamento,  $A_1$  e  $A_2$  sono i due istanti temporali nei quali viene fatta la misura.

Avendo a disposizione la reale capacità della batteria è possibile calcolare il SOH come da definizione.

Il corretto funzionamento di questa tecnica si basa sul fatto di scegliere nella maniera più opportuna due istanti di tempo associati a diversi stati di carica. Per garantire il corretto funzionamento dell'algoritmo si deve avere che la stima del SOC sia il più possibile vicina a quella reale; questo aspetto non è stato analizzato in [42].

Il primo test è stato effettuato scegliendo nel profilo di carica di fig. 44, a partire dal punto  $A_s$ , due punti. Lo scopo di tale scelta è garantire che la stima della capacità ottenuta, minimizzi lo scarto quadratico medio tra essa stessa e il valore reale, determinato con lo stesso metodo usato nella tecnica precedente.

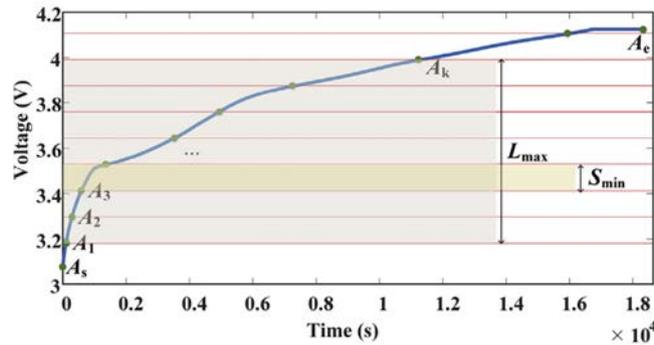


Figura 44: Profilo di carica utilizzato per la stima del SOH [42].

Il secondo test è stato condotto utilizzando un algoritmo NSGA per la scelta dei due punti nel profilo di carica. La lunghezza dell'intervallo scelto è un compromesso tra il fatto che deve essere il più breve possibile, in modo tale da restituire velocemente il risultato. Tuttavia, al diminuire dello stesso aumenta anche l'errore che si compie nella stima. Per poter essere applicato l'algoritmo NSGA è necessario disporre dei profili di carica al variare dell'invecchiamento della cella.

Il vantaggio principale di questo metodo è legato alla sua facile implementazione a livello di BMS. Tuttavia nei casi reali bisogna porre particolare attenzione all'operazione di integrale, visto che anche un piccolo offset nella misura può portare ad un errore elevato. Inoltre, l'efficacia di questo metodo si basa sul fatto di disporre della curva di carica e da qui scegliere i migliori istanti. In una applicazione reale non è possibile conoscere a priori l'andamento della curva di carica, in quanto questa dipende da fattori esterni come la disponibilità temporale della colonnina e la potenza che riesce ad erogare.

### 3.4 SPETTROSCOPIA D'IMPEDENZA ELETTROCHIMICA

La spettroscopia d'impedenza elettrochimica, spesso abbreviata con EIS, è una tecnica molto potente che, con un solo esperimento svolto in un ampio range di frequenze, permette la caratterizzazione di sistemi elettrochimici. Attraverso questa è possibile determinare ed isolare l'influenza dei fenomeni fisici e chimici, operazione che sarebbe stata più lunga e complessa se fossero state utilizzate altre tecniche, data la diversità dei fenomeni analizzati. [43]

Negli ultimi anni la EIS ha trovato ampio uso come strumento per determinare le caratteristiche di materiali complessi come colle, batterie, fuel cells e per l'analisi di fenomeni corrosivi.

L'idea alla base del funzionamento della spettroscopia è di applicare un piccolo segnale di eccitazione, che può essere sinusoidale o ad onda quadra, al sistema in esame e misurarne la risposta. Il segnale di eccitazione può essere una corrente e quindi in questo caso si misura una tensione, altrimenti, se viene applicata una tensione la risposta

che si misura è una corrente.

Nel caso in cui si applichi come segnale di eccitazione una corrente sinusoidale, ossia:

$$I(t) = \Delta i \cdot \sin(\omega t) \quad (10)$$

con  $\Delta i$  ampiezza della sinusoide e  $\omega$  pulsazione della sinusoide, il segnale che si misurerà nel sistema in test sarà:

$$V(t) = \Delta V \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (11)$$

dove  $\Delta V$  è l'ampiezza del segnale in tensione e  $\phi$  lo sfasamento rispetto al segnale in ingresso.

La serie di Taylor del segnale di tensione è data da:

$$\Delta V = \left( \frac{dV}{di} \right)_{V_0, i_0} \cdot \Delta i + \frac{1}{2} \left( \frac{d^2V}{di^2} \right)_{V_0, i_0} \cdot \Delta i^2 + \dots \quad (12)$$

Se l'ampiezza del segnale di perturbazione  $\Delta i$  è abbastanza piccola da garantire una risposta lineare del sistema, la (12) può essere troncata al primo termine, quindi ad uno sviluppo del primo ordine assumendo trascurabili gli altri.

Di conseguenza l'impedenza del sistema può essere calcolata utilizzando la Legge di Ohm:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (13)$$

Si nota come l'impedenza non sia una funzione costante, ma presenti un suo modulo e una sua fase che dipendono dalla frequenza del segnale di eccitazione. Quindi, variando la pulsazione  $\omega$ , è possibile tracciare l'impedenza del sistema per tutto l'intervallo di frequenze desiderate. Tipicamente il range delle frequenze utilizzate varia tra i 0.1 Hz e i 100 kHz.

Essendo l'impedenza un numero complesso e variabile, è necessario studiare quali possano essere i metodi per meglio rappresentarla. Tipicamente le rappresentazioni utilizzate sono tre: in coordinate polari, diagrammi di Bode o diagrammi di Nyquist.

In una rappresentazione in coordinate polari l'impedenza viene rappresentata come:

$$Z(\omega) = |Z|e^{j\phi} \quad (14)$$

dove  $|Z|$  è il modulo e  $\phi$  la fase.

Un'altra tipologia di rappresentazione è quella che utilizza i diagrammi di Bode, tuttavia nel campo della spettroscopia applicata alle batterie non trova impiego.

Trova larga diffusione la rappresentazione basata sull'utilizzo dei diagrammi di Nyquist, ottenuti da una rielaborazione della (14), dalla quale sono state estratte le informazioni riguardanti la parte reale

e complessa dell'impedenza. Esse vengono rappresentate come un punto in un grafico cartesiano avente come asse delle ascisse la parte reale e nell'asse delle ordinate l'opposto della parte immaginaria.

Per poter meglio comprendere i diagrammi di Nyquist ricavati mediante IES, è utile richiamare quali sono gli andamenti della risposta in frequenza di un resistore ideale, di un gruppo RC e della loro combinazione. La risposta del primo viene rappresentata come un punto fisso nell'asse reale, pari al valore della resistenza e quindi indipendente dalla frequenza. Il diagramma di Nyquist di un gruppo RC in parallelo è funzione della frequenza, la cui rappresentazione grafica è una circonferenza passante per l'origine e centrata nell'asse reale, come indicato in fig. 45.

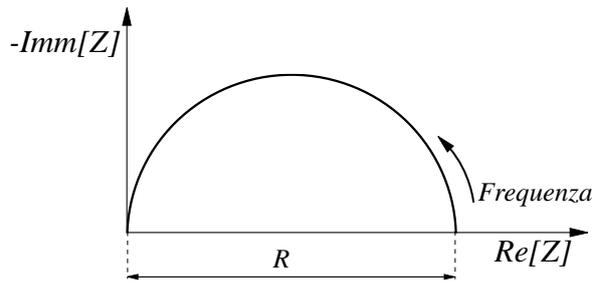


Figura 45: Diagramma di Nyquist di un gruppo RC ideale.

Si ottiene tale andamento grafico da [44]:

$$Z(i\omega) = R + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C \frac{1}{C}} \cdot \frac{\frac{1}{R} - j\omega C}{\frac{1}{R} - j\omega C} =$$

$$\frac{R - j\omega CR^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2} = R \cdot \frac{1 - j\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (15)$$

Questa formulazione del diagramma di Nyquist corrisponde ad una semicirconferenza passante per l'origine, centrata nell'asse delle ascisse e tale da raggiungere un valore massimo di  $R/2$ . La pulsazione vale  $1/\tau$  con  $\tau$  costante di tempo, ottenuta dal prodotto tra la resistenza e il condensatore.

Si nota che ad alta frequenza il condensatore assume il comportamento di un cortocircuito. Di conseguenza l'impedenza del gruppo RC tende a zero, mentre a basse frequenze ci si riconduce al caso di un semplice resistore, poiché il condensatore si comporta in modo equivalente ad un circuito aperto.

Essendo che i diagrammi di Nyquist sono basati su una rappresentazione grafica, è possibile identificare molto rapidamente i fenomeni che avvengono nel sistema, dal momento che spesso essi corrispondono a particolari andamenti dell'impedenza.

Lo svantaggio principale nell'utilizzo di questo metodo è legato al fatto che, nella rappresentazione grafica, non sono contenute le indicazioni sulle frequenze alle quali sono state svolte le misurazioni.

L'impedenza è in genere definita per i soli sistemi lineari; tuttavia può essere determinata anche per sistemi non lineari, come le batterie, se si può considerarla lineare tempo invariante (condizione LTI). Questo vuol dire che il numero complesso rappresentativo dell'impedenza ad una determinata frequenza non deve cambiare durante la fase di misurazione e affinché questo avvenga, devono essere soddisfatte le condizioni di: [45]

- la corrente di eccitazione deve generare una risposta in tensione all'interno del campo di variazione lineare della cella;
- la temperatura della cella deve rimanere costante durante la misurazione;
- la batteria deve essere caricata o scaricata il meno possibile durante la misurazione poiché l'impedenza è funzione dello stato di carica.

### 3.5 MODELLIZZAZIONE DI UNA CELLA

In letteratura sono utilizzati tre differenti approcci per la modellizzazione di una batteria agli ioni di litio. Il primo usa un approccio *white box*, sfruttando la sola conoscenza delle equazioni teoriche alla base del funzionamento della batteria; nel secondo, *grey box*, le equazioni vengono combinate con la conoscenza di alcuni parametri e infine nel terzo, il modello è determinato avendo solamente i parametri della batteria. [46]

Sono presenti una grande varietà di circuiti elettrici equivalenti che possono essere utilizzati come modello. La scelta dipende dall'applicazione per cui è necessario lo studio. Per esempio, nello studio di una smart grid, il modello di batteria che si può utilizzare sarà sicuramente più semplice rispetto a quello usato in un'operazione di diagnosi.

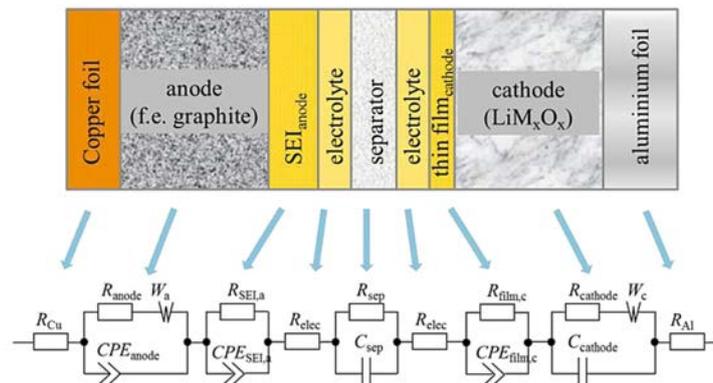


Figura 46: Descrizione del circuito equivalente associato ad ogni elemento in una cella [46].

In fig. 46 è riportato il circuito equivalente complessivo di una cella dove, per ogni elemento costitutivo, è associato un gruppo di elementi.

Si nota come siano presenti degli elementi circuitali che si discostano da quelli classici, come possono essere un resistore o un condensatore. Essi sono utili per descrivere al meglio i fenomeni non lineari che avvengono all'interno di una cella agli ioni di litio. Presentato il pregio di poter approssimare molto bene i diagrammi di Nyquist, ma di contro, non possiedono una anti-trasformata di Laplace. Questo non rende possibile trasferire tali parametri dal dominio delle frequenze a quello del tempo, senza ricorrere a delle approssimazioni. [47]

Il gruppo RC viene sostituito dall'impedenza di ZARC:

$$Z_{ZARC} = \frac{1}{\frac{1}{R} + (j\omega)^{\psi\theta}} \quad (16)$$

costituita dal parallelo di un resistore ideale R e da un elemento denominato *Constant Phase Element* (CPE):

$$Z_{CPE} = \frac{1}{(j\omega)^{\psi\theta}} \quad (17)$$

per considerare il fatto che gli elettrodi non sono delle placche piane e non hanno confini uniformi, perché sono prodotti con elevata porosità per intercalare gli ioni litio.

Il fattore di depressione  $\psi$  ha valori compresi tra zero e uno, mentre  $\theta$  è una capacità generalizzata. Se  $\psi$  e  $\theta$  sono uguali a zero, l'impedenza ZARC è equivalente ad un resistore ideale; viceversa, se  $\psi$  è uguale a uno, ci si riporta al caso di un gruppo RC con il condensatore avente capacità pari a  $\theta$ . [47]

In fig. 47 è riportato il significato geometrico di  $\psi$ . Il fattore di depressione è legato all'angolo che l'asse reale forma con la retta congiungente il centro della circonferenza. Il significato fisico di avere  $\psi$  diverso da uno è da ricercare nel fatto di non avere un unico valore della costante di tempo  $\tau$  in quanto, essendo in presenza di elementi distribuiti e non a parametri concentrati, si stabilisce solamente un valore medio attorno al quale i valori si distribuiscono.

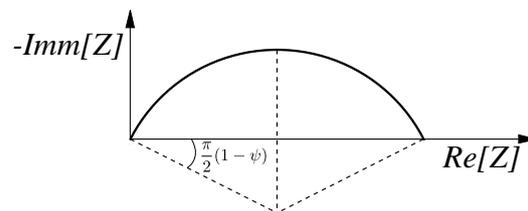


Figura 47: Diagramma di Nyquist dell'impedenza ZARC.

L'altro elemento che s'introduce per meglio rappresentare il diagramma di Nyquist di una cella è l'impedenza di Warburg  $Z_w$ , definita come:

$$Z_w = R \cdot \frac{\tanh(\sqrt{j\omega\sigma})}{\sqrt{j\omega\sigma}} \quad (18)$$

dove  $\sigma$  è il coefficiente di Warburg.

Questa impedenza è stata appositamente sviluppata per descrivere i fenomeni diffusivi che possono instaurarsi quando tra l'elettrodo e l'interfaccia si verifica una reazione redox o di ossido-riduzione. L'impedenza di Warburg dà il maggior contributo in termini d'impedenza totale, quando si lavora alle basse frequenze, dal momento che la capacità di diffusione è maggiore rispetto che alle alte frequenze.

Il coefficiente di Warburg  $\sigma$  è una costante e dipende dai coefficienti di diffusione. Solitamente lo si determina come la pendenza del tratto a  $45^\circ$  nel grafico del diagramma di Nyquist.

Gli elementi appena descritti sono utili per rappresentare al meglio il diagramma di Nyquist di una cella. Tuttavia i parametri necessari alla loro descrizione sono molto spesso di difficile identificazione. Per ovviare a questo problema, come descritto in [47], si utilizza una catena di gruppi in serie di resistenze e condensatori in parallelo: più se ne usano migliore sarà l'approssimazione.

Come scritto in precedenza, la complessità del modello da utilizzare dipende dal tipo di applicazione. Nel caso della diagnosi dello stato di salute di un accumulatore, trovano ampio impiego modelli simili a quello riportato in fig. 48.  $V_{OCV}$  è la tensione a circuito aperto caratteristica della batteria,  $L$  è un'induttanza,  $R_{ohm}$  è la resistenza ohmica,  $R_{SEI}$  la resistenza del SEI,  $CPE_{SEI}$  la capacità associata al SEI,  $R_{CT}$  è la resistenza al trasferimento di carica,  $CPE_{dl}$  è la capacità del *double layer*,  $Z_w$  l'elemento di Warburg e  $V_{batt}$  la tensione nominale che si può misurare ai capi della batteria.

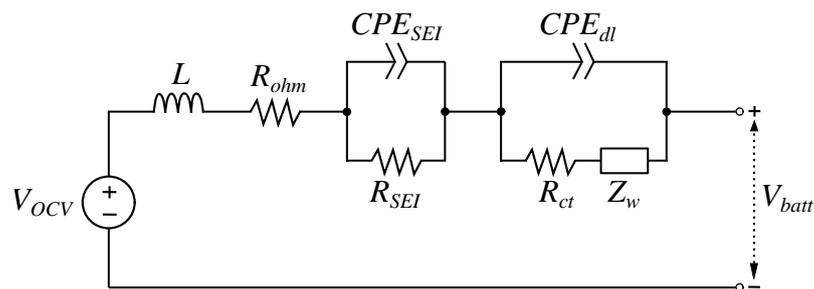


Figura 48: Modello equivalente della batteria [48].

Per spiegare il significato dei componenti che compaiono nel modello di fig. 48, si può utilizzare la spettroscopia d'impedenza. Infatti viene utilizzata come mezzo per identificare i parametri incogniti di un sistema.

Ricordando come l'impedenza possa essere rappresentata in un diagramma di Nyquist, in fig. 49 è riportato l'andamento della stessa riferita al modello di fig. 48.

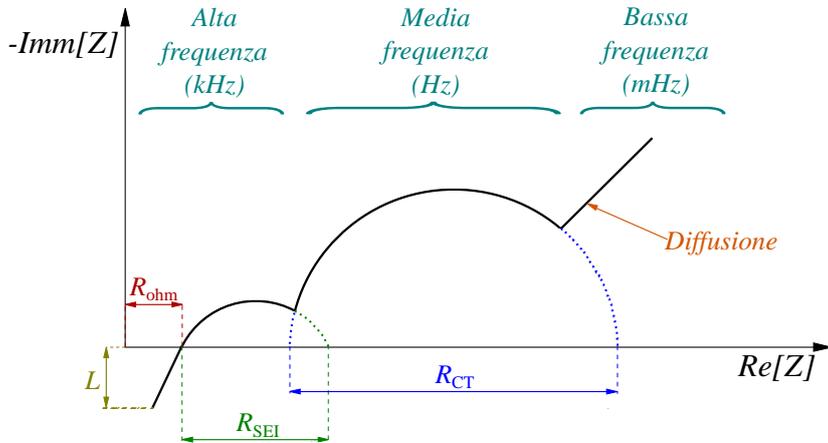


Figura 49: Diagramma di Nyquist dell'impedenza del modello di una batteria [48].

Come si osserva da fig. 49, lo spettro è suddiviso in tre regioni in funzione della frequenza alla quale è stata rilevata l'impedenza.

- **alta Frequenza:** ( $>2$  kHz), descrive l'induttanza associata agli elementi metallici presenti nelle celle e nel circuito di misura. Si può osservare inoltre il punto in cui l'impedenza presenta parte immaginaria nulla. Questo punto corrisponde alla resistenza ohmica  $R_{ohm}$  ricavata dalla somma di  $R_{Cu}$ ,  $R_{elec}$  e  $R_{Al}$  che compaiono nel modello di fig. 46. Un'altro fenomeno presente in alta frequenza è dato dalla presenza dell'interfaccia solida SEI. Ricordando come la formazione del SEI è complementare con la perdita di capacità e quindi con l'invecchiamento, questo contributo viene spesso escluso nella modellizzazione della batteria perché ritenuto ininfluenza;
- **media frequenza:** (1 Hz-2 kHz), in questa zona si trovano gli effetti dovuti al processo di trasferimento di carica tra elettrolita, SEI, interfaccia e nel materiale attivo (sia nell'anodo che nel catodo). Nel diagramma di Nyquist questo fenomeno è rappresentabile con un arco di circonferenza le cui caratteristiche geometriche sono date dai valori assunti dalla resistenza  $R_{CT}$  e dal  $CPE_{dl}$ , spesso indicato come un condensatore per semplificare la stima parametrica;
- **basse Frequenze:** ( $<1$  Hz), sono presenti fenomeni legati alla diffusione nei materiali attivi, descritti dall'impedenza di Warburg.

Nel modello di fig. 49 non è stato considerato il contributo del separatore dal momento che la capacità è piccola se confrontata con gli altri elementi.

Quanto appena illustrato ha carattere puramente indicativo in quanto spesso i risultati ottenuti dalle prove sperimentali non presentano mai delle zone di demarcazione così ben definite.

### 3.6 PARAMETRI DELLA BATTERIA IN FUNZIONE DELL'INVECCHIAMENTO

La conoscenza del modello della batteria è di fondamentale importanza in tutte quelle tecniche in cui la stima dell'invecchiamento della batteria viene realizzata attraverso delle misure dirette, come nella spettroscopia o nella stima della capacità.

L'obiettivo che ci si pone è analizzare se nel modello della batteria ci siano dei parametri che più sono soggetti all'invecchiamento e quindi alla perdita di capacità, in modo tale che una misura degli stessi possa restituire un'indicazione sullo stato di salute.

In letteratura sono stati svolti molti test con l'obiettivo di determinare quale sia il parametro che meglio possa indicare lo stato di salute della batteria. Si è osservato come i fattori esterni siano predominanti nell'invecchiamento, fenomeno che si è potuto osservare anche nella sezione 3.2, dove il SOC, la temperatura e la corrente di scarica giocavano un ruolo fondamentale nella perdita di capacità e quindi nell'invecchiamento.

Negli anni sono stati effettuati molti studi con l'obiettivo di capire al meglio quale sia, o quale siano, i parametri che più rispecchiano l'invecchiamento della batteria. Per identificarli vengono svolti in laboratorio dei test di invecchiamento dove, ad intervalli prefissati, viene eseguita la spettroscopia d'impedenza per valutare come cambiano i valori del modello della batteria. I test condotti non si limitano solo a delle cariche-scariche a vari C-rate ma simulano anche l'effetto della temperatura nell'invecchiamento e nella variazione dei parametri.

In seguito sono presentati i risultati ottenuti in [49]. Sono state testate tre differenti batterie  $\text{LiFePO}_4$  NMC e saranno riportati i risultati per una sola tipologia ij in quanto le conclusioni che si ottengono possono essere estese anche per le altre celle. Le misurazioni d'impedenza sono state svolte in un range di frequenze compreso tra 10 mHz e 10 kHz, ad una temperatura di 25 °C per tre differenti livelli di SOC: 20%, 50% e 80% con un segnale di perturbazione a media nulla. Le misure di impedenza sono state effettuate ogni 550 cicli, dove un ciclo corrisponde ad una carica-scarica a 4 C-rate (10 A), con una profondità di scarica del 60%, cioè tra il 20% e l'80% del SOC ad una temperatura di 25 °C.

In fig. 50 sono riportati gli andamenti dell'impedenza rispettiva-

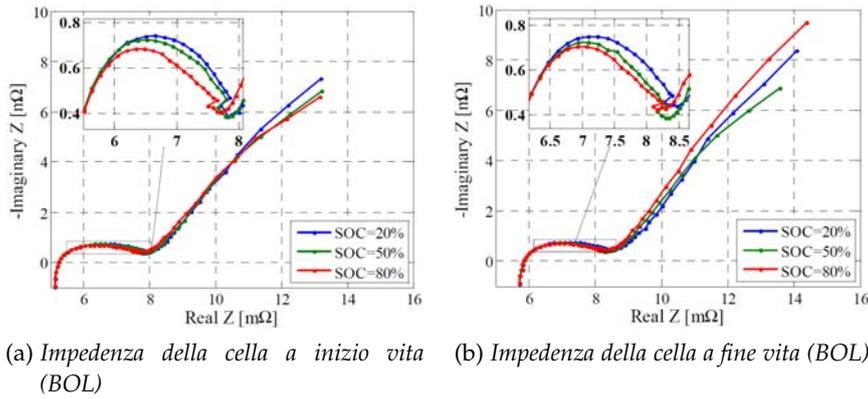


Figura 50: Diagrammi di Nyquist della cella a inizio e fine vita [49].

mente per una cella ad inizio vita (*Beginning Of Life*, BOL) e a fine vita (*End Of Life*, EOL). Si osserva come la dipendenza dal SOC sia più marcata alle basse frequenze e per l'effetto dell'invecchiamento le curve in fig. 50(b) siano traslate a destra rispetto a quelle di fig. 50(a).

Al fine di valutare come l'impedenza vari in funzione dell'invecchiamento, in fig. 51 sono riportate le varie misurazioni, ognuna svolta ogni 550 cicli ad un SOC del 50%. È evidente come l'effetto dell'invecchiamento porti ad una graduale traslazione verso destra delle curve facendole leggermente variare di forma.

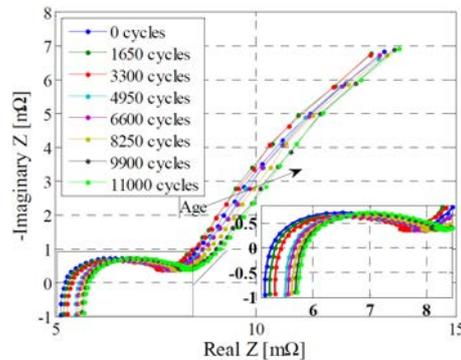


Figura 51: Variazione dell'impedenza per effetto dell'invecchiamento [49].

In fig. 52 sono riportati gli andamenti delle resistenze del modello di fig. 48 al variare dello stato di carica e del numero di cicli. In fig. 52(a) è rappresentato l'andamento della resistenza  $R_{ohm}$ , che presenta un progressivo incremento all'aumentare del numero dei cicli e come si era visto in precedenza, rimane pressoché uguale al variare del SOC.

In fig. 52(b) è presente la resistenza  $R_{SEI}$ , la quale presenta un andamento monotono decrescente in funzione del SOC e un progressivo incremento all'aumentare del numero di cicli eseguiti.

In fig. 52(c) è infine presentato l'andamento della resistenza al trasferimento di carica  $R_{CT}$ . Anche in questo caso si ha un andamento

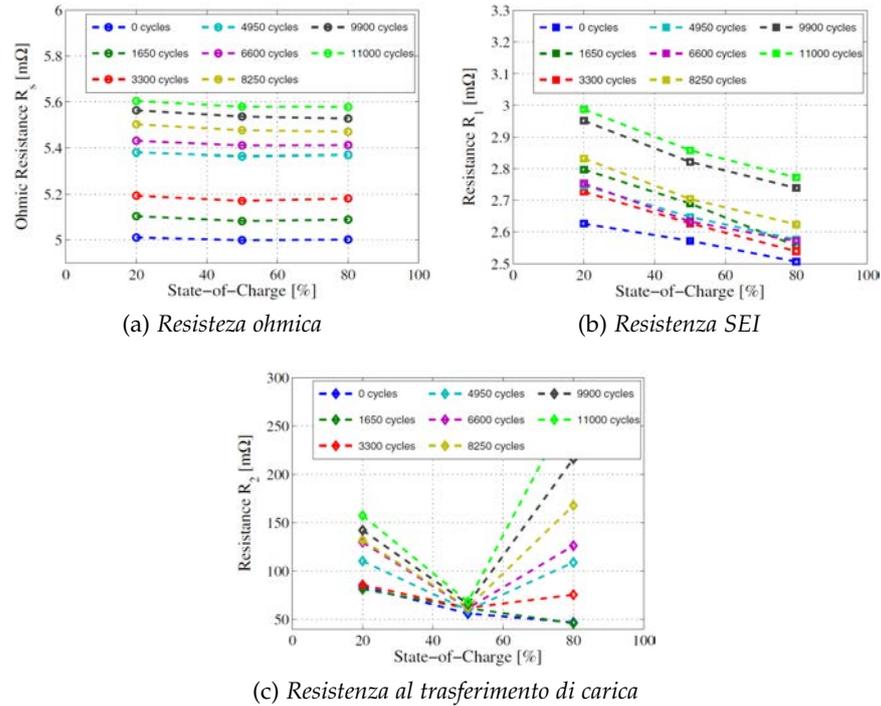


Figura 52: Andamento dei valori della resistenza al variare del numero dei cicli e dello stato di carica [49].

crescente in funzione del numero di cicli e quindi dello stato di salute. A differenza dei casi precedenti, la dipendenza dal SOC è più evidente con una significativa variazione per i valori di  $R_{CT}$  per il 50% e l'80% del SOC. Si nota una sostanziale differenza nei valori assunti dalla resistenza al variare del numero dei cicli. Se nei casi precedenti si determinava una differenza del 10% tra i valori di BOL e EOL in questo caso si ha una differenza massima del 90%.

In fig. 53 è riportato l'andamento crescente delle resistenze.  $TC_1$  e  $TC_2$  si riferiscono alle altre due batterie che in questo estratto sono state omesse. È evidente l'andamento crescente di entrambe le grandezze, a dimostrazione del fatto che sia possibile stimare il SOH avendo a disposizione una misura di resistenza.

Un'aspetto omesso in [49] è la dipendenza dei parametri del modello della batteria dalla temperatura. Come in precedenza spiegato, all'aumentare della temperatura la mobilità delle cariche è maggiore e questo comporta un aumento più lento della resistenza (l'effetto della temperatura è stato analizzato in [50]). Anche in questo caso sono stati svolti dei test di invecchiamento in modo analogo a quanto visto in precedenza, solo che sono stati ripetuti a  $-10^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$  e  $40^\circ\text{C}$  per tre differenti celle NMC, prodotte dalla Kokam modello SLPB100216216H.

In fig. 54 è riportato l'andamento della  $R_{ohm}$  misurata a diverse temperature in funzione del SOC. Si noti come per temperature basse

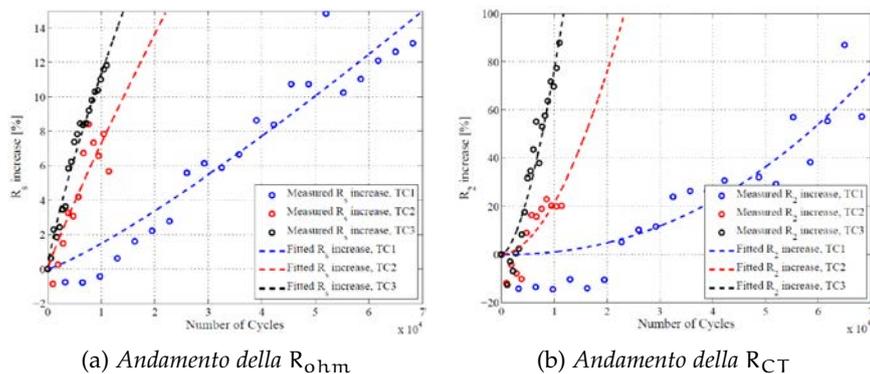


Figura 53: Andamento delle principali resistenze per effetto dell'invecchiamento [49].

la resistenza sia più elevata, dal momento che è diminuita la mobilità delle cariche. In questa figura si conferma la quasi nulla dipendenza della resistenza dallo stato di carica come in precedenza affermato.

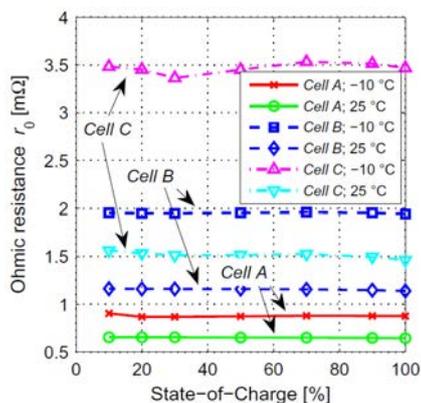


Figura 54: Dipendenza di  $R_{ohm}$  dalla temperatura [50].

In fig. 55 è riportata la dipendenza della  $R_{CT}$  dalla temperatura in un grafico in scala logaritmica. Si nota che anche in questo caso c'è una progressiva diminuzione all'aumentare della temperatura. Nel grafico si osserva una relazione lineare tra le due grandezze perché è in scala logaritmica, mentre in una scala lineare si sarebbe notato un andamento ad iperbole.

Si è visto come attraverso la spettroscopia possano essere ricavate molte informazioni riguardanti lo stato di salute della batteria, dal momento che l'andamento dell'impedenza è funzione del numero di cicli. Ricordando poi come l'invecchiamento sia correlato ad una perdita di capacità e come questa cali in modo lineare all'aumentare del numero di cicli, è possibile utilizzare la spettroscopia come tecnica di stima diretta del SOH.

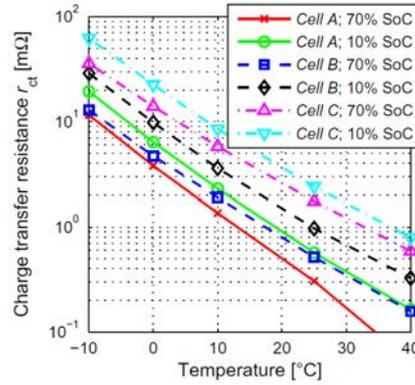


Figura 55: Dipendenza di  $R_{CT}$  dalla temperatura [50].

Si è scelto di utilizzare, come parametro per la stima del SOH, la resistenza come in [51]:

$$SOH = \frac{R_{EOL} - R_c}{R_{EOL} - R_{BOL}} \times 100 \quad (19)$$

dove  $R_{EOL}$  è la resistenza a fine vita,  $R_c$  è la resistenza al momento della misurazione, mentre  $R_{BOL}$  è la resistenza ad inizio vita.

In questo caso si è scelto di utilizzare la resistenza come parametro per valutare la stima del SOH. In linea generale è possibile affermare che, il miglior parametro da osservare, è quello avente una variazione il più simile possibile alla curva rappresentante la diminuzione di capacità in funzione del numero di cicli.

Attraverso la (19) si ottiene una stima del SOH espressa in percentuale. Questa formula impone che, per ottenere una stima corretta, ci debba essere una relazione lineare tra la resistenza e l'invecchiamento. Tuttavia questo non sempre è vero, comportando dunque piccoli errori di stima.

Resta ancora da determinare quale sia la resistenza  $R_c$  da utilizzare nella (19). Nella precedente trattazione si è visto come ci sia un progressivo incremento all'aumentare del numero di cicli, sia della resistenza ohmica che di quella al trasferimento di carica. Come è possibile valutare in fig. 52(c), la resistenza al trasferimento di carica  $R_{CT}$  presenta valori e variazioni molto più elevati rispetto a  $R_{ohm}$ . L'ordine di grandezza di questi parametri è il  $m\Omega$ , rendendo necessario l'utilizzo di una strumentazione molto precisa per la loro misurazione. Per questo motivo l'utilizzo di  $R_{CT}$  per la stima del SOH permette di ottenere un errore minore in quanto il campo di variazione è maggiore.

## SPETTROSCOPIA NEI VEICOLI ELETTRICI E STRUMENTAZIONE DI PROVA

---

La spettroscopia d'impedenza è una tecnica di diagnosi che può essere facilmente utilizzata nei veicoli elettrici per il monitoraggio del pacco batteria. Infatti, come in precedenza visto, la variazione dei parametri dell'accumulatore rappresenta una chiara indicazione sul suo stato di salute. Inoltre, i parametri identificati grazie all'utilizzo della spettroscopia, possono essere utilizzati dal BMS per ottimizzare il funzionamento dell'intero sistema, al fine di incrementarne la vita utile. Si pensi, per esempio, ad un accumulatore prossimo allo stato di EOL; se questa informazione è nota al BMS, esso può modulare l'erogazione della potenza in quanto correnti di scarica elevate portano ad un più veloce invecchiamento.

Ricordando come un pacco batteria sia formato da numerosi moduli di celle in serie e parallelo, la spettroscopia d'impedenza può essere utilizzata come strumento di diagnosi per verificare la presenza di un modulo guasto, velocizzando quindi la sua riparazione o sostituzione.

### 4.1 IMPLEMENTAZIONE DELLA EIS

Come visto in precedenza, il funzionamento della spettroscopia d'impedenza si basa sull'eccitare la batteria con un segnale di corrente o tensione per misurarne la risposta. Di conseguenza, è necessario l'utilizzo di una sorgente che possa generare il segnale di eccitazione. In letteratura si trovano descritte due soluzioni. Nella prima, l'eccitazione è generata da una richiesta di potenza da parte dell'inverter che alimenta il motore e viene eseguita durante il normale funzionamento del veicolo. Tuttavia in questo caso non è possibile stabilire a priori quale sia il segnale di eccitazione in quanto dipende dalle condizioni di utilizzo. La seconda soluzione consiste nell'utilizzare il caricatore on-board o off-board durante le fasi di ricarica. Il vantaggio nell'utilizzo di questo metodo è legato al fatto che è possibile controllare il segnale che viene iniettato nella batteria, poiché, nei caricatori è sempre presente una logica di controllo.

In seguito si esplorerà come sia possibile implementare la seconda soluzione in un caricatore, utilizzando come segnale di eccitazione una corrente e misurando una tensione.

L'implementazione della spettroscopia d'impedenza in un pacco batteria trae beneficio dal fatto che sono presenti centinaia di celle connesse in serie, perciò la corrente di eccitazione può essere gene-

rata una sola volta per l'intero accumulatore. La presenza in ogni modulo di un sensore per la misurazione di tensione, rende possibile l'eseguirsi della spettroscopia nel singolo gruppo di elementi.

I parametri del segnale di eccitazione dipendono dalle caratteristiche del pacco batteria, principalmente dalla sua tensione nominale. In generale si parla di un segnale di corrente sinusoidale a media nulla con ampiezza picco-picco nell'ordine delle decine di Ampere, tale da produrre una risposta in tensione lineare non introducendo fenomeni di saturazione e con una frequenza variabile tra 0.1 Hz e 5 kHz.

#### 4.2 PROGETTAZIONE DEL CARICATORE CON EIS

Indipendentemente venga utilizzato un caricatore on-board o off-board, l'implementazione della spettroscopia non fa variare la configurazione circuitale, in quanto è sempre presente un convertitore affiancato dalla sua logica di controllo. In fig. 56 è riportato lo schema a blocchi di un caricatore che permette di eseguire la spettroscopia.

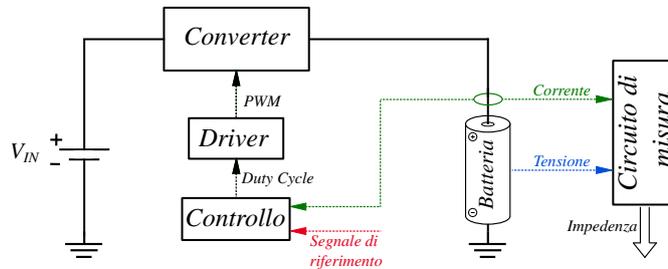


Figura 56: Schema a blocchi di un caricatore con EIS.

Le prove simulative sono state svolte utilizzando Matlab® e l'ambiente di simulazione Simulink. La tipologia di convertitore, scelto per la realizzazione del caricatore, è il buck o step-down bidirezionale in potenza di fig. 57. La bidirezionalità rende possibile l'utilizzo dello stesso sia per la fase di carica che per quella di scarica.

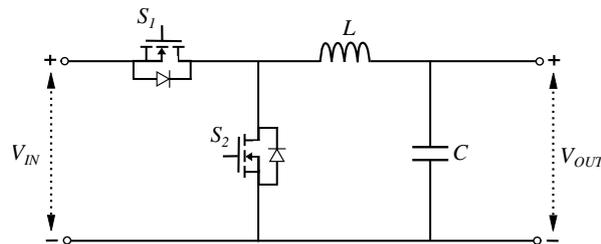


Figura 57: Convertitore Buck bidirezionale.

I parametri del caricatore utilizzato per la simulazioni sono riportati in tab. 18.

Il convertitore presenta una banda passante di  $1/2\pi\sqrt{LC} = 45.94$  kHz, più che sufficiente per eseguire la spettroscopia, dal momento che la massima frequenza del segnale di eccitazione è di 10 volte inferiore.

Parametri	Valore	Descrizione
$V_{IN}$	30 V	Tensione DC in ingresso
L	$600 \times 10^{-6}$ H	Induttanza
C	$20 \times 10^{-9}$ F	Condensatore
$f_{sw}$	100 kHz	Frequenza di commutazione

Tabella 18: Specifiche convertitore buck utilizzato nella simulazione.

La scelta di utilizzare un buck bidirezionale è dovuta alla volontà di poter usufruire dello stesso convertitore sia per caricare che scaricare la batteria. Così facendo, si riesce a realizzare in un solo dispositivo, con una sola logica di controllo, uno strumento per eseguire tutte le fasi del processo d'invecchiamento.

Nell'applicazione pratica della spettroscopia ad un convertitore buck, non è strettamente necessario che esso sia bidirezionale in potenza. Tuttavia, come in precedenza discusso, la bidirezionalità è utile nel caso in cui si collegasse il veicolo elettrico ad una smart grid.

#### 4.2.1 Sintesi del controllore di corrente

Come si osserva in fig. 56 il corretto inseguimento del segnale di riferimento è garantito dall'utilizzo di un controllore. In questo caso si è scelto di realizzare un controllo di corrente per l'anello interno. Esso ha la funzione di regolare la corrente di ricarica e di creare il segnale di eccitazione per l'esecuzione della spettroscopia. Un eventuale anello esterno di tensione può essere utilizzato durante la fase di carica per controllare la tensione della cella.

Il convertitore è un sistema discontinuo e non lineare dal momento che il suo comportamento è descritto da equazioni differenziali che variano in funzione del duty cycle, rendendolo un sistema a struttura variabile. In una applicazione reale valutare il comportamento del sistema istante per istante non ha nessuna valenza pratica perché trascurabile nel normale funzionamento. Per questa ragione si applica il *Time Averaging* (TA), cioè si osserva il solo effetto medio. Si esegue la media del valore istantaneo in una finestra temporale pari al periodo di commutazione, facendo poi scorrere la finestra nel tempo. Lo scorrimento è equivalente ad una operazione di media mobile la cui espressione è data dalla:

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^t x(\tau) d\tau \quad (20)$$

Attraverso l'operazione di Time Averaging si rende il sistema solamente continuo, la non linearità rimane. La linearizzazione viene

realizzata attraverso un'analisi ai piccoli segnali fatta in un intorno del punto di lavoro del sistema:

$$x(t) = X + \hat{x}(t) \quad (21)$$

dove  $X$  è il valore della variabile a regime mentre  $x(t)$  è una piccola perturbazione nell'intorno del punto di lavoro.

Il modello è ora continuo e lineare ed è possibile determinare le funzione di trasferimento tra le variabili controllate e da controllare. L'approssimazione di time averaging è da ritenersi valida fino a quando la banda passante del controllore è pari al massimo ad un decimo della frequenza di commutazione.

Lo schema a blocchi utilizzato per la sintesi del controllore di corrente è riportato in fig. 58.

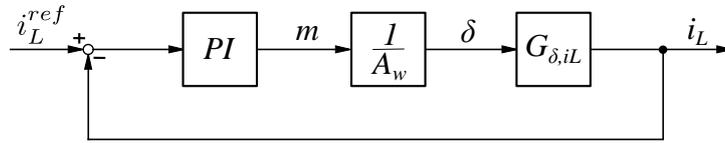


Figura 58: Schema a blocchi utilizzato per la sintesi del controllore di corrente.

Si può dimostrare come sia possibile stabilizzare l'anello di corrente attraverso l'utilizzo di un regolatore proporzionale. Tuttavia si è deciso di utilizzare un regolatore proporzionale-integrale per ottenere un guadagno elevato anche alle basse frequenze. Per effetto dell'integrale, si ottiene un sistema di tipo uno che permette di avere un errore nullo a regime a fronte di un ingresso a gradino, migliorando anche la capacità di reiezione ai disturbi. Il duty cycle  $\delta$  si crea attraverso un modulatore digitale, il quale confronta il segnale modulante proveniente dal regolatore con la portante di frequenza  $f_{sw}$  di ampiezza  $A_w$ . Il blocco  $G_{\delta, i_L}$  rappresenta la funzione di trasferimento tra il duty cycle e la variabile  $i_L$  da controllare.

Le specifiche di progetto utilizzate per la per sintesi del controllore secondo il metodo di Bode sono: la banda passante dell'anello di corrente e il margine di fase. Ricordando come la struttura di un regolatore PI sia:

$$PI(s) = k_p \frac{1 + s\tau_i}{s\tau_i} \quad (22)$$

dove  $k_p$  è il guadagno proporzionale e  $\tau_i$  è la costante di tempo del regolatore data da  $\tau_i = k_p/k_i$  con  $k_i$  costante integrale.

Definito il guadagno ad anello come:

$$L(s) = PI(s) \cdot \frac{1}{A_w} \cdot G_{\delta, i_L}(s) \quad (23)$$

le costanti  $k_p$  e  $k_i$  secondo il metodo di Bode si trovano imponendo:

$$\begin{cases} |L(j\omega_{bi})| \stackrel{!}{=} 1 \\ \pi + \angle L(j\omega_{bi}) \stackrel{!}{=} \Phi_m \end{cases} \quad (24)$$

dove  $\omega_{bi}$  è la banda passante dell'anello di controllo e  $\Phi_m$  il margine di fase.

Per la progettazione del controllore non si è preso in considerazione il modello della batteria in quanto anche nelle applicazioni reali non è possibile conoscere a priori.

Per verificare il corretto funzionamento del controllo si è testato il convertitore con un segnale dato dalla somma di più sinusoidi a varie frequenze. Il risultato è riportato in fig. 59.

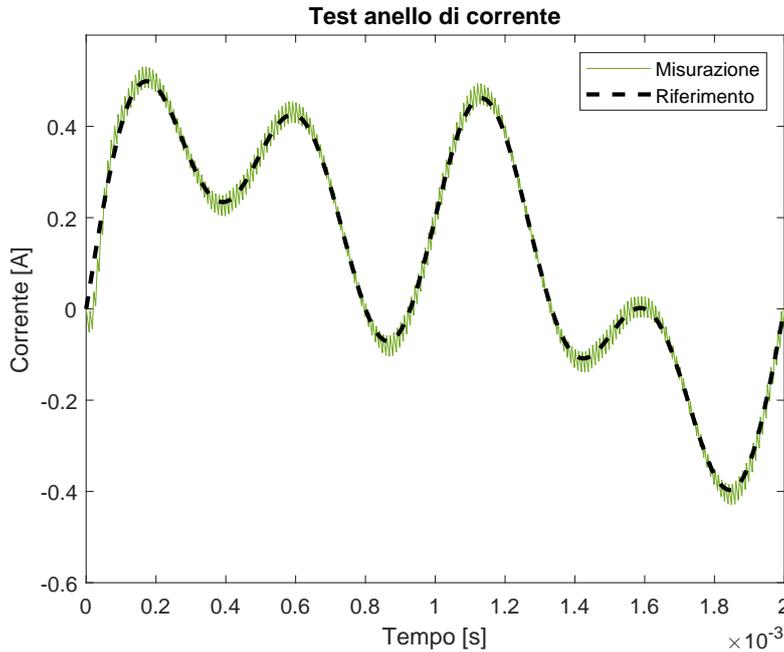


Figura 59: Test di funzionamento dell'anello di corrente. Il segnale di riferimento è dato dalla somma di quattro sinusoidi ognuna di ampiezza 200 mA e di frequenza  $f = 250, 500, 1000, 1500$  Hz.

In fig. 59 è rappresentato il segnale di corrente in uscita dal convertitore che insegue in modo fedele il riferimento. Il rumore sovrapposto al segnale misurato è il ripple di corrente dell'induttore e dipende dal valore dell'induttanza.

#### 4.2.2 Scelta del segnale di eccitazione

La scelta del segnale di eccitazione ricopre un ruolo fondamentale nel corretto funzionamento dell'EIS. Si può dimostrare come sia necessario che l'ordine del segnale di eccitazione deve essere uguale al numero di parametri incogniti da stimare se si vogliono ottenere delle informazioni consistenti [52].

In letteratura come segnali di eccitazione non vengono solo usati quelli sinusoidali ma anche variazioni a gradino. Tuttavia il convertitore dovrebbe avere una banda passante infinita affinché venga riprodotta in uscita una variazione a gradino, ma questo è fisicamente impossibile. Per questo motivo si preferisce che il segnale di eccitazione sia una somma di sinusoidi ognuna delle quali ad una frequenza ben precisa.

Il segnale di eccitazione è dato dalla:

$$r_{ac}(t) = \sum_{j=1}^l m_j \sin(\omega_j t + \phi_j) \quad (25)$$

dove  $l$  è il numero di sinusoidi e  $m_j$ ,  $\omega_j$  e  $\phi_j$  sono l'ampiezza, la frequenza e la fase della  $l$ -esima sinusoide.

Se il modello da stimare dispone di  $N$  parametri incogniti allora:

$$l \geq \begin{cases} \frac{N}{2}, & \text{se } N \text{ è pari} \\ \frac{N+1}{2}, & \text{se } N \text{ è dispari} \end{cases} \quad (26)$$

Mentre la fase  $\phi_j$ , espressa in radianti, è data dalla:

$$\phi_j = \begin{cases} \text{Un valore casuale,} & \text{se } j = 1 \\ \phi_1 - \frac{j(j-1)}{l}, & \text{se } j \geq 2 \end{cases} \quad (27)$$

L'ampiezza del segnale di perturbazione deve essere scelta in modo tale che la batteria lavori all'interno della sua zona di funzionamento lineare. Un approccio empirico si basa sull'aumentare  $m_j$  fintanto che non si osservi una distorsione nell'uscita. È chiaro che una maggiore ampiezza del segnale di corrente genera una maggiore ampiezza del segnale di tensione in uscita, facilitandone la misura.

#### 4.2.3 Simulazione della spettroscopia

Per verificare il funzionamento del caricatore come strumento per eseguire la spettroscopia d'impedenza, sono stati realizzati due circuiti aventi un diagramma di Nyquist simile a quello di una batteria agli ioni di litio. Essi sono riportati in fig. 60.

Il circuito di fig. 60(a) rappresenta il modello più semplice che possa essere utilizzato per modellare una batteria agli ioni di litio. La funzione di trasferimento tra tensione e corrente è:

$$\frac{V_{batt} - V_{SOC}}{I_{batt}} = \frac{(R_{ct}R_{ohm}) + R_{ohm}R_{ct}C_{ct}s}{1 + R_{ct}C_{ct} \cdot s} \quad (28)$$

Per verificare il corretto funzionamento del caricatore come strumento per eseguire la spettroscopia, si è voluto tracciare il diagramma di Nyquist del circuito di fig. 60(a) in modo sperimentale.

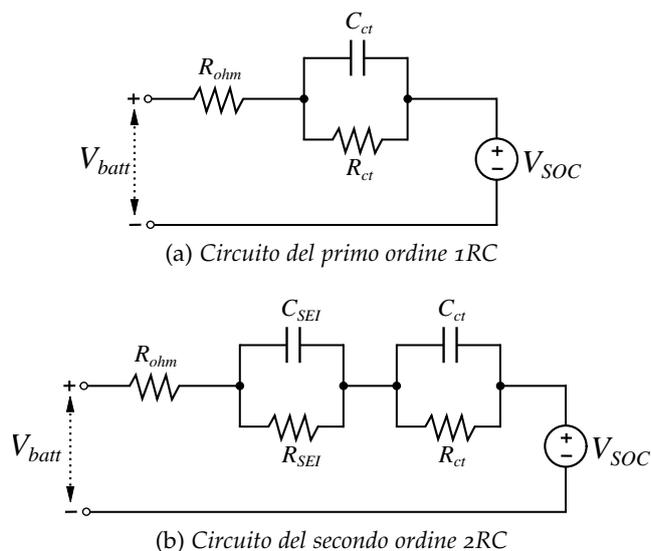


Figura 60: Circuiti di test per il caricatore EIS.

Il circuito è stato collegato al buck di fig. 57 in modo tale da essere visto come un carico. Il controllore di corrente è stato utilizzato per iniettare nel carico una serie di segnali sinusoidali in corrente a media nulla, ampiezza costante e ad una frequenza variabile tra 1 Hz e 2500 Hz. Misurata la risposta in tensione del carico e con l'ausilio di Matlab, si è eseguito la FFT (*Fast Fourier Transform*) del segnale di tensione e di corrente. Facendone il rapporto si è poi determinata l'impedenza del circuito alla frequenza del segnale di corrente iniettato. Ripetendo più volte questa operazione si è tracciato il diagramma di Nyquist sperimentale per punti, (il risultato è riportato in fig. 61).

Si osserva come i punti determinati sperimentalmente siano sovrapposti alla curva teorica. Se questo non dovesse accadere, le cause vanno ricercate in una non corretta progettazione del circuito per la spettroscopia o ad una mancanza di risoluzione nell'operazione di trasformazione. Si ricorda come la precisione nella trasformata di Fourier sia indirettamente proporzionale alla durata del periodo di osservazione del segnale da trasformare, il quale è definito come  $N \cdot T_s$  dove  $N$  è il numero di campioni e  $T_s$  il periodo di campionamento. Una scelta abituale è quella di aumentare il numero di campioni dal momento che difficilmente si può agire in  $T_s$ , essendo che il Teorema del campionamento di Nyquist-Shannon comporta una condizione stringente nella scelta della frequenza di campionamento.

In egual modo si vuole trovare il diagramma di Nyquist per punti anche del circuito di fig. 60(b), la cui funzione di trasferimento tra tensione e corrente, a differenza di quella del caso precedente, è del secondo ordine, da qui il nome del modello.

Il risultato è riportato in fig. 62, si nota come l'andamento dell'impedenza è più simile a quello di una batteria agli ioni di litio.

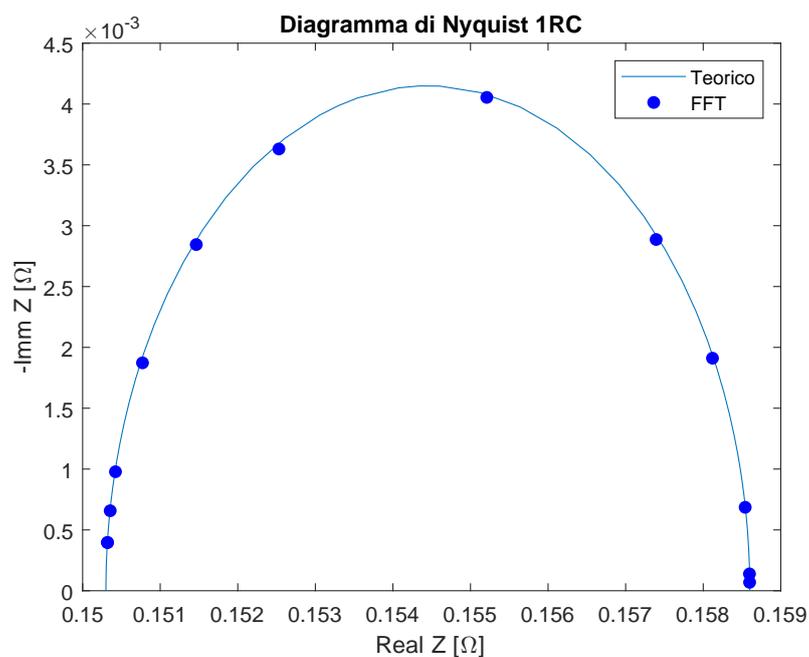


Figura 61: Confronto tra il diagramma di Nyquist teorico e quello ottenuto per punti attraverso la EIS per il modello del primo ordine.

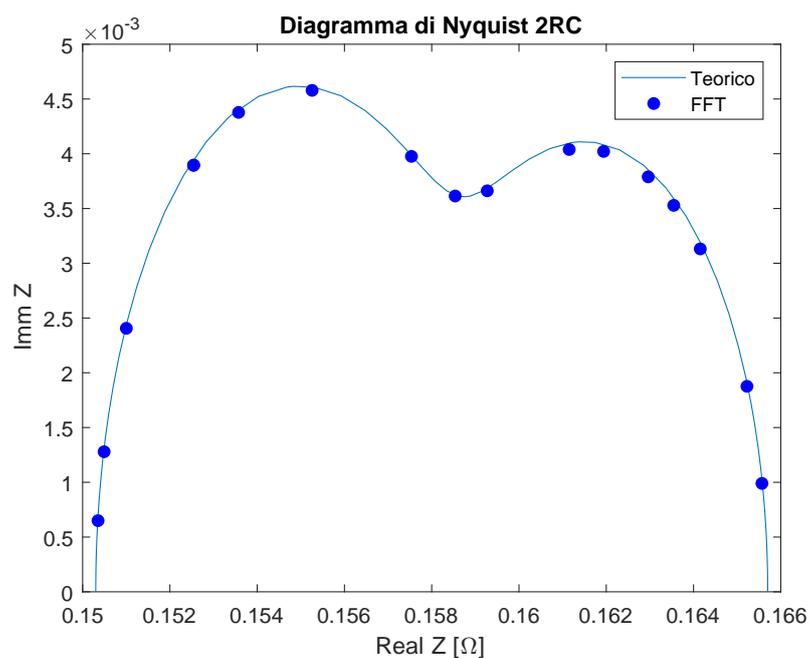


Figura 62: Confronto tra il diagramma di Nyquist teorico e quello ottenuto per punti attraverso la EIS per il modello del secondo ordine.

Si ricorda come l'obiettivo della spettroscopia d'impedenza sia determinare i parametri del modello equivalente della batteria per identificare lo stato di salute della stessa. In letteratura esistono varie tecniche utilizzate per ricavare i parametri dalle misure sperimentali. Alcune si basano su osservazioni empiriche sull'andamento assun-

to dai dati sperimentali, questa tecnica è utilizzata in [53]; tuttavia si ottiene un errore in percentuale anche superiore al 10% che, in un'applicazione precisa come quella in esame, non è accettabile.

Metodi più efficaci si basano sull'utilizzo di una stima ricorsiva ai minimi quadrati. Questa tecnica viene usata in [54] attraverso l'utilizzo di un programma denominato ZView®, che permette la rappresentazione del diagramma di Nyquist, ma offre anche un tool per la stima dei parametri del modello equivalente.

ZView® è stato utilizzato la determinazione dei parametri del circuito di fig. 61 e fig. 62. I risultati sono riportati in tab. 19 e in fig. 63. L'errore in percentuale è calcolato come la differenza tra il valore vero e quello sperimentale, diviso il valore vero. Si osserva come gli errori in percentuale assumano un valore molto piccolo. Questo è dovuto ad una corretta scelta della finestra temporale utilizzata per raccogliere i campioni e ad una corretta inizializzazione dei parametri iniziali per la stima in ZView®.

	Valore reale	1RC		2RC	
		Valore sper.	Err. %	Valore sper.	Err. %
$R_{ohm}$	0.1503 $\Omega$	0.15032 $\Omega$	0.033 %	0.15034 $\Omega$	0.026 %
$R_{ct}$	$8.3 \times 10^{-3} \Omega$	$8.26 \times 10^{-3} \Omega$	0.48 %	$8.28 \times 10^{-3} \Omega$	0.24 %
$C_{ct}$	$160.3 \times 10^{-3} F$	$160.13 \times 10^{-3} F$	0.081 %	$160.36 \times 10^{-3} F$	0.037 %
$R_{SEI}$	$7.1 \times 10^{-3} \Omega$	-	-	$7.02 \times 10^{-3} \Omega$	1.126 %
$C_{SEI}$	3 F	-	-	2.952 F	1.6 %

Tabella 19: Riepilogo parametri stimati con ZView®.

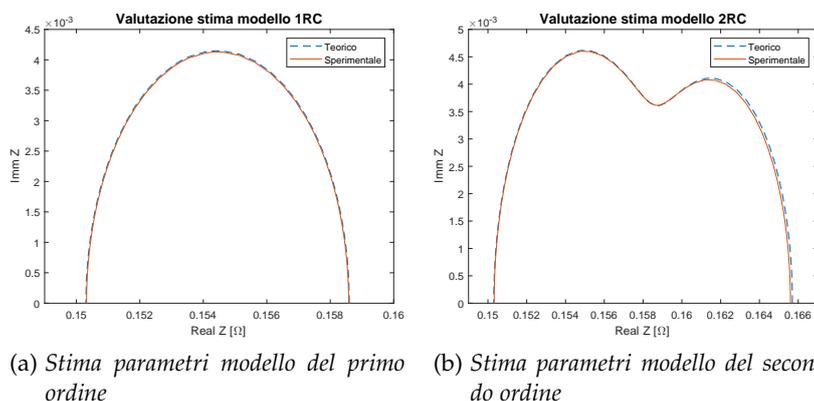


Figura 63: Stima dei parametri del modello equivalente della batteria con ZView®.

#### 4.2.4 Stima dei parametri del modello con Matlab®

Dato per appurato che l'utilizzo di ZView® restituisce dei parametri del modello stimato del circuito di test molto simili a quelli reali, si è voluto utilizzare Matlab®, per ottenere lo stesso risultato.

La funzione utilizzata è stata *fitnlm*, che permette di stimare i parametri di modelli non lineari utilizzando una stima ai minimi quadrati. Essa è stata usata per la stima dei parametri del modello del secondo ordine 2RC. In particolare, gli argomenti richiesti dalla funzione *fitnlm* sono stati una serie di punti, composti ognuno dal modulo dell'impedenza e alla frequenza a cui è stata ricavata. I parametri del modello da stimare sono stati i coefficienti del modulo della funzione di trasferimento, cioè:

$$R_{ohm} + \frac{R_{ct}}{C_{ct}^2 R_{ct}^2 \omega^2 + 1} + \frac{R_{SEI}}{C_{SEI}^2 R_{SEI}^2 \omega^2 + 1} \quad (29)$$

Per rendere la stima robusta, si è inserito tra i parametri della funzione *fitnlm* una tolleranza pari a  $10^{-10}$ .

Eseguito il codice, i parametri ottenuti sono:  $R_{ohm}=0.1503 \Omega$ ,  $R_{ct}=0.0083 \Omega$ ,  $C_{ct}=0.15683 \text{ F}$ ,  $R_{SEI}=0.0071 \Omega$  e  $C_{SEI}=2.9112 \text{ F}$ .

#### 4.2.5 Simulazione del processo di carica e scarica

Verificato il corretto funzionamento del convertitore buck come strumento per l'esecuzione della spettroscopia, esso è stato utilizzato per caricare e scaricare una batteria gli ioni di litio. La scarica della cella è resa possibile dal fatto che il convertitore progettato è bidirezionale in potenza.

Per la carica è stato necessario inserire l'anello di controllo della tensione, dal momento che la ricarica di una batteria agli ioni di litio è composta da due fasi: la prima a corrente costante, seguita da una fase a tensione costante pari a 4.2 V fino al completamento della carica. La progettazione dell'anello di controllo della tensione non ha richiesto scelte progettuali molto avanzate, perché, essendo la fase di carica un processo con una dinamica estremamente lenta, non è necessario che il controllo della tensione presenti una banda passante molto elevata.

Per la simulazione è stato utilizzato un modello di batteria integrato nelle librerie di Simulink, avente una capacità nominale di 2600 mAh, tensione nominale di 3.63 V, una tensione di cut-off di 2.75 V e una massima corrente di ricarica pari a 5.6 A.

Per limitare la corrente durante la fase di carica, si è inserito il blocco di saturazione nel riferimento di corrente, a monte dell'anello di controllo della corrente. Quando s'inserisce una non linearità, come può essere il fenomeno della saturazione, non è più possibile stabilire a priori il comportamento del sistema controllato e di conseguenza bi-

sogna porre particolare attenzione ad eventuali fenomeni indesiderati che possono avvenire.

Il controllore utilizzato è di tipo proporzionale integrale. Quando subentra il fenomeno della saturazione l'errore all'ingresso dell'integrale è non nullo e di conseguenza l'uscita dell'integratore continua ad aumentare, rimanendo comunque limitata dal blocco di saturazione. Quando la saturazione della corrente cessa, l'uscita dell'integrale è ancora abbastanza elevata da mantenere il sistema in saturazione, fino a quando, per il fenomeno opposto a quello che ha portato l'integrale in saturazione, avviene la desaturazione dell'azione integrale. L'effetto provocato in termini di tensione in uscita è un errore non nullo e una sovraelongazione. Per evitare la saturazione dell'integrale si utilizzano delle tecniche di *anti windup*: l'idea è quella di fermare l'azione integrale non appena si rilevi la presenza di saturazione.

La tecnica utilizzata nel convertitore buck è descritta in fig. 64.  $K_P$  e  $K_I$  sono rispettivamente il guadagno proporzionale e integrale del controllore PI, mentre  $K_S$  è ottenuto da  $K_I/K_P$  e serve per evitare la saturazione dell'integrale. Non appena si presenta tale fenomeno, l'ingresso di  $K_S$  è non nullo e l'uscita si andrà a sottrarre al riferimento dell'integrale evitando così spiacevoli sovraelongazioni dell'uscita.

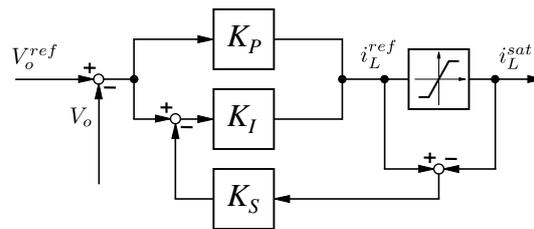


Figura 64: Anello di controllo della tensione di uscita con implementato una tecnica per la desaturazione dell'azione integrale.

Data l'elevata capacità computazionale richiesta per la simulazione del processo di carica e scarica, è stata ridotta la frequenza di switching del convertitore a 1 kHz. Si è potuta adoperare una diminuzione della frequenza, in quanto la dinamica del processo da controllare è nell'ordine delle ore. Di conseguenza la diminuzione della banda passante dei controllori non genererà problemi di stabilità o di tempi di risposta.

In fig. 65 è riportata la simulazione del processo di carica con una corrente, nella fase a corrente costante, pari a  $1C$  ( $=2.6 A$ ). Si osserva come la massima corrente venga erogata per un periodo molto breve, fino a quando la cella raggiunge una tensione di 4.2 V. Questo intervallo di tempo non dipende dai parametri del circuito di carica ma dalla chimica della batteria: più è elevato il tempo in cui la cella riesce ad assorbire la corrente massima, minori saranno i tempi di ricarica.

Raggiunta la tensione di 4.2 V la corrente assorbita decresce in modo esponenziale, fino ad arrivare idealmente al valore 0 A indice che la carica è completata. Nella realtà la carica viene interrotta prima,

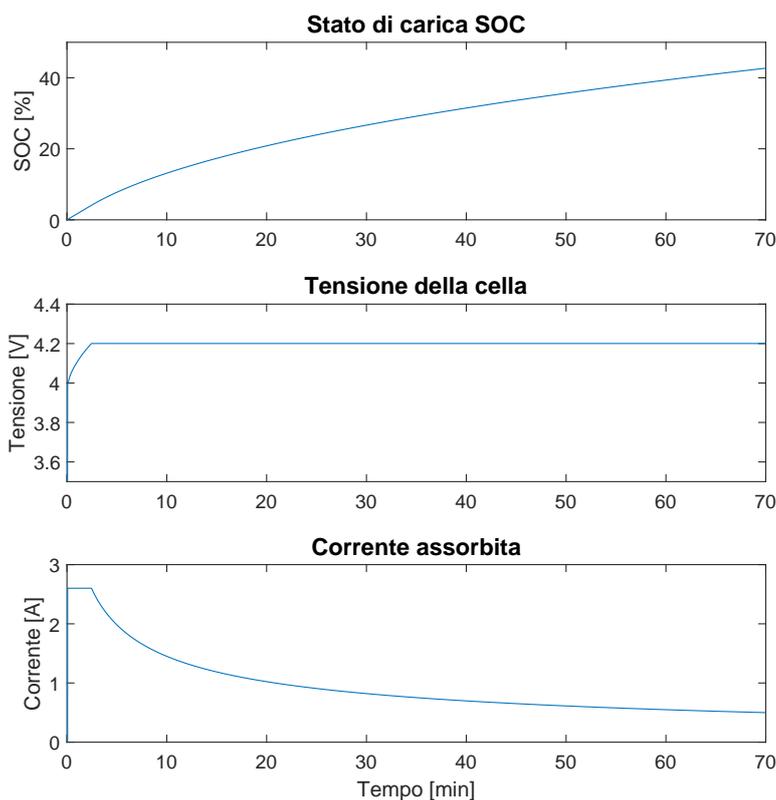


Figura 65: Simulazione del processo di carica a 1C.

quando la corrente assorbita si è ridotta a circa ad un ventesimo di quella nominale.

Per verificare il comportamento del convertitore sono state eseguite delle prove di scarica a corrente costante (i risultati sono riportate in fig. 66). In questa tipologia di test l'anello di controllo della tensione non è più necessario, in quanto si vuole solamente controllare la corrente erogata dalla batteria. L'unica tensione che deve essere monitorata è la minima tensione che la cella può raggiungere, in questo caso, pari a 2.8 V.

L'esecuzione del test di scarica è stata permessa poiché il convertitore utilizzato è bidirezionale in potenza; di conseguenza impostando un riferimento negativo della corrente, la rete di alimentazione si è comportata da utilizzatore assorbendo la corrente erogata dalla batteria.

#### 4.3 STRUMENTAZIONE DI PROVA

Si ricorda come l'obiettivo sia tracciare sperimentalmente il diagramma di Nyquist per una cella agli ioni di litio, allo scopo di determinarne i parametri utili per la stima dello stato di salute.

A tal fine è necessario costruire uno strumento che possa eseguire la spettroscopia d'impedenza. Nel mercato esistono prodotti realizza-

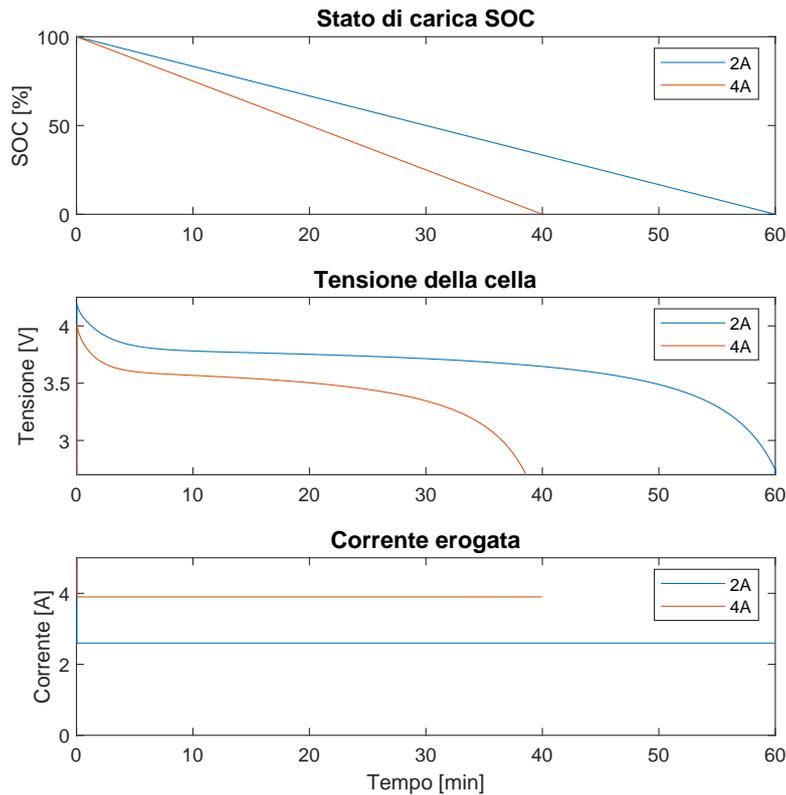


Figura 66: Simulazione del processo di scarica a 2.6 A e 4 A.

ti con il fine unico di eseguire la spettroscopia. Tuttavia, dal momento che l'obiettivo è d'implementarla del caricatore di un veicolo elettrico, si è deciso di realizzare un setup sperimentale che permettesse di ottenere dei risultati applicabili anche in un caricatore.

In fig. 67 è riportato il setup del banco di prova.

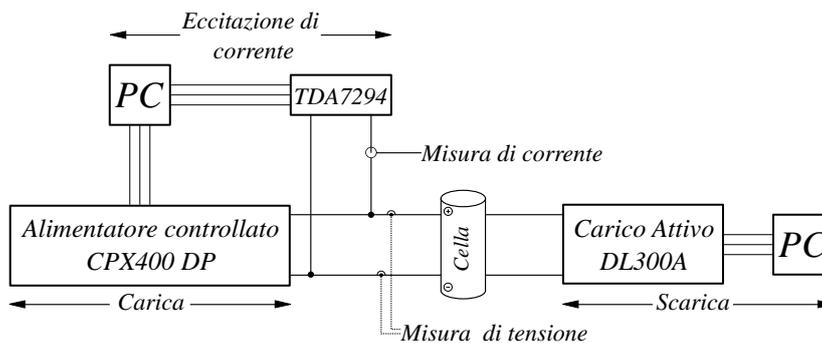


Figura 67: Setup sperimentale del banco di prova.

In seguito è riportata la lista della strumentazione usata:

- **alimentatore Controllato CPX400DP** prodotto dalla *Thurlby Thandar Instruments*. Dispone di due uscite ognuna avente una tensione compresa tra 0 e 60 V, una corrente tra 0 e 20 A per una potenza massima di 420 W. Presenta due modalità di funziona-

mento: a tensione o corrente costante. L'alimentatore è utilizzabile tramite pannello frontale ed è inoltre dotato di un'interfaccia Ethernet e seriale che ne permette il controllo da remoto da PC;

- **carico attivo DL300A** prodotto dalla *Rigol*. Dispone di due canali nei quali è possibile collegare un carico fino a 150 V e 40 A in DC per una potenza massima dissipata di 200 W. Sono presenti 4 modalità di funzionamento principali: scarica a corrente costante (CC), a tensione costante (CV), a potenza costante (CP) e a resistenza costante (CR). Per la caratterizzazione di batterie, il carico elettronico mette a disposizione una modalità di funzionamento specifica, dove, oltre alla corrente di scarica, è possibile impostare la tensione di cut-off oltre la quale viene interrotta la prova. Il display presente nel dispositivo, riporta sia la durata del test che la capacità scaricata dalla batteria;
- **CompactRIO 9082** prodotto dalla *National Instrument*. Utilizzato per interfacciare la strumentazione con il PC attraverso una comunicazione con cavo Ethernet. Il dispositivo presenta al suo interno due modalità di funzionamento: la prima utilizza il processore *Controller Legacy* operante ad una frequenza di 1.33 GHz ed è utilizzato per le operazioni in real time; la seconda modalità sfrutta la FPGA *Xilinx Spartan-6 LX150*, con una frequenza di clock di 40 MHz utile nel caso si avesse la necessità di parallelizzare l'esecuzione delle istruzioni. Al dispositivo è possibile collegare un massimo di otto moduli esterni, i quali si interfacciano direttamente con le porte I/O della scheda FPGA. In questa prova sono stati utilizzati tre moduli NI9215, NI9263 e NI9403, rispettivamente un DAC e un ADC aventi entrambi 4 ingressi/uscite, una frequenza di campionamento di 100 kHz, un valore di fondoscala di  $\pm 10$  V e 16 bit utilizzati per la conversione. Il terzo modulo presenta 32 ingressi e uscite digitali;
- **Amplificatore TDA7294** prodotto dalla *ST*. È un amplificatore tipicamente utilizzato in campo audio e in grado di erogare fino a 100 W in un carico di 4  $\Omega$  o 8  $\Omega$ . In questa applicazione viene utilizzato per amplificare il segnale di tensione proveniente dal CompactRio al fine di iniettare nella cella una corrente proporzionale al segnale d'ingresso. La progettazione della scheda di amplificazione che utilizza il TDA7294 verrà trattata in seguito;
- **Cella ICR18650-26JM** prodotta dalla *Samsung*. È una cella agli ioni di litio NMC formato 18650 molto utilizzata in campo hobbistico e negli utensili a batteria.

Le specifiche nominali della cella sono riportate in tab. 20.

Le batterie agli ioni di litio sono degli accumulatori che, se non adoperate all'interno della loro SOA (*Safe Operating Area*), possono

Parametro	Descrizione
Capacità Nominale	2600 mAh (0.2 C, 2.75 V tensione di cut-off)
Capacità minima	2550 mAh (0.2 C, 2.75 V tensione di cut-off)
Tensione di Ricarica	4.2 ± 0.05 V
Tensione Nominale	3.63 V
Metodo di Ricarica	CC-CV (Tensione costante con corrente limitata)
Corrente di Ricarica	Ricarica Standard: 1300 mA Ricarica Rapida: 2600 mA
Tempo di ricarica	Ricarica Standard: 3 h Ri- carica Rapida: 2.5 h
Massima Corrente di Ricarica	2600 mA (Temperatura ambiente di 25 °C)
Massima Corrente di Scarica	5200 mA (Temperatura ambiente di 25 °C)
Tensione di cut-off	2.75 V
Massa	45 g
Temperatura di funzionamento	Carica: 0-45 °C Scarica: -20-60 °C

Tabella 20: Specifiche nominali della ICR18650-26J M [55].

incorrere in malfunzionamenti tali da comprometterne l'uso. Per questo motivo bisogna prestare molta attenzione ai loro parametri di lavoro e alle condizioni ambientali.

La carica della cella avviene utilizzando l'alimentatore controllato CPX400DP, nel quale viene impostato una tensione massima di 4.2 V e una corrente massima di carica fornita dal produttore della cella.

#### *Carica della cella*

La procedura di carica a fondo delle celle agli ioni di litio si compone di una fase di carica a corrente costante o potenza costante, seguita da una fase a tensione costante. Durante la prima fase la corrente viene mantenuta fissa al valore massimo impostato, mentre la tensione cresce fino al valore di 4.2 V.

Durante la seconda fase la tensione è mantenuta costante al valore precedente raggiunto, mentre la corrente gradualmente si riduce contestualmente all'aumento dello stato di carica della cella. Nel datasheet del prodotto è riportato che si considera la batteria completamente carica, quando il processo viene eseguito con una corrente massima di 0.2C (520 mA) e durante la fase a tensione costante si raggiunge una corrente di 0.05C (13 mA) oppure dopo un tempo totale di 7 h.

Nelle prove sperimentali si è scelto di porre come punto di fine per la fase di carica, una corrente di 0.08 A, cioè 0.03C.

### *Scarica della cella*

La scarica può avvenire in due modi: collegando la cella ad un opportuno carico oppure utilizzando un carico attivo, (in questo caso si è usato il carico elettronico DL300A). Le modalità di scarica da esso supportate sono a tensione costante, a corrente costante, a resistenza costante o a potenza dissipata costante.

La scarica della cella agli ioni di litio viene ottenuta attraverso la modalità a corrente costante fino al raggiungimento della tensione minima o di cut-off che, nel caso della batteria in esame corrisponde a 2.75 V. Tuttavia, la cella può essere definita completamente scarica solo se la fase a corrente costante è seguita da una a tensione costante. In questa parte la tensione è mantenuta fissa al valore raggiunto durante la scarica a corrente costante e la corrente erogata cala fino ad un valore prossimo allo zero.

Nelle prove sperimentali la scarica a tensione costante non è stata eseguita, in quanto il completo scaricamento della cella è una condizione che è sempre preferibile non ottenere, perché c'è il rischio di danneggiare l'accumulatore.

#### *4.3.1 Procedura di prova*

L'obiettivo del setup sperimentale di fig. 67 è mostrare come l'invecchiamento della batteria causi una variazione dei parametri del modello della stessa. Per far ciò è necessario sottoporre la cella a dei cicli di carica e scarica e, ad intervalli regolari, eseguire la spettroscopia per rilevarne i parametri.

L'alimentatore controllato viene utilizzato per la carica della batteria e il carico attivo per la scarica. Questa operazione viene eseguita in modo ciclico lasciando al PC il compito di controllare.

Uno dei maggiori problemi riscontrati è stato scegliere lo strumento per l'operazione di spettroscopia. In prima analisi, si era optato di progettare un convertitore buck con un controllore digitale. Tuttavia, durante le fasi di progettazione, si è visto come nel mercato sia difficile trovare convertitori che dispongano di un ingresso per il solo controllo dello switch. Questo avrebbe necessitato di sviluppare da zero un convertitore buck. Per questa ragione si è deciso di utilizzare un amplificatore audio, in particolare il TDA7294 e di inglobarlo in una scheda elettronica che contenesse tutte le interfacce con le varie strumentazioni.

In fig. 68 è riportato il diagramma di flusso riassuntivo delle fasi che compongono il test, a partire dalle prove di base per la caratterizzazione della cella fino ad arrivare al calcolo del SOH secondo la definizione (6). L'idea che si vuole realizzare è di creare una serie di programmi e interfacce che, se combinate assieme, eseguano in modo automatico le fasi del test.

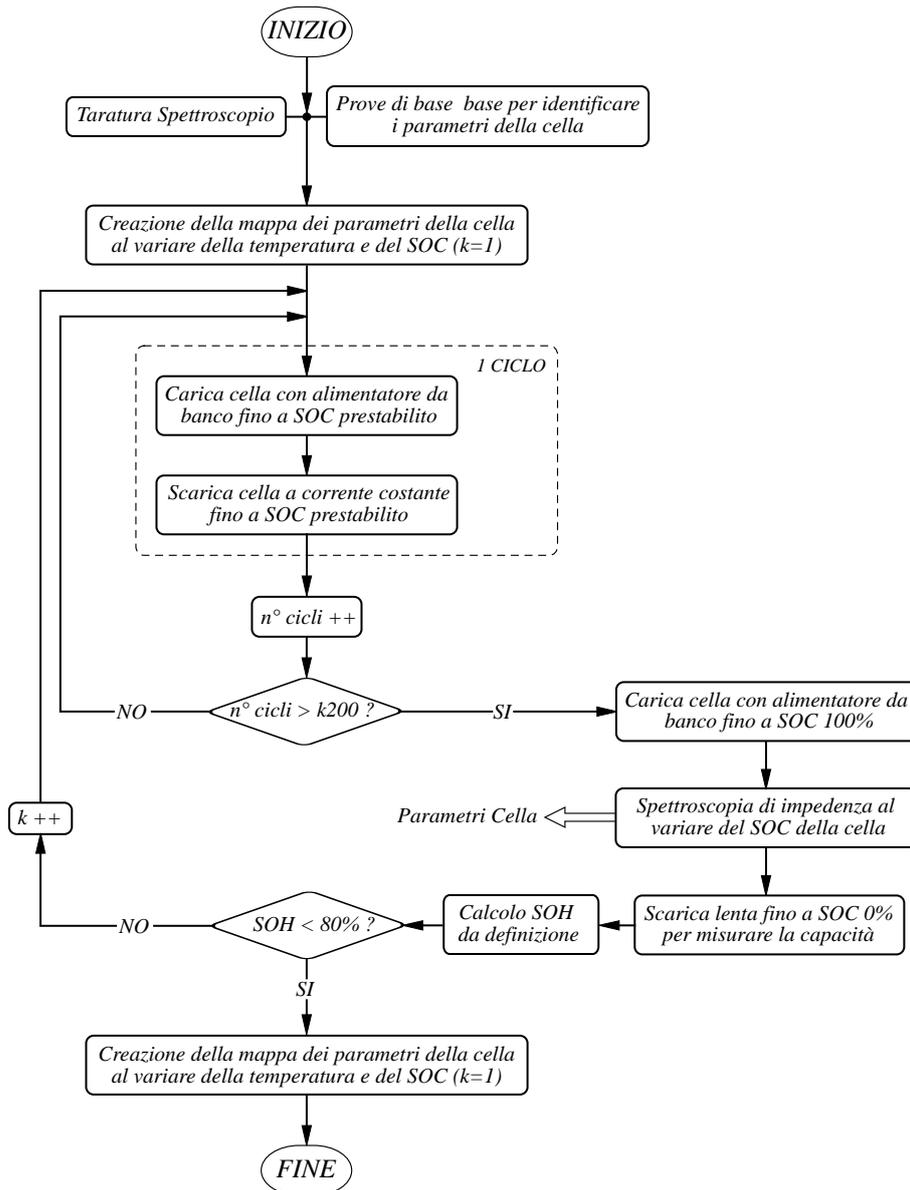


Figura 68: Diagramma di flusso del test.

#### 4.4 INTERFACCIA LABVIEW

Prima di iniziare le prove sperimentali si è reso necessario studiare e sviluppare un modo che permettesse al PC di interfacciarsi con gli strumenti di laboratorio, per poterli controllare e acquisire i dati dal momento che, allo stadio primordiale dello sviluppo non era presente un'interfaccia di comunicazione tra i dispositivi.

Per fare quest'operazione si è scelto di utilizzare il programma Lab-View della *National Instruments*, tipicamente utilizzato per operazioni di controllo e acquisizione di dati in ambiente di laboratorio. Questa scelta ha facilitato il lavoro in quanto sono presenti già molte librerie e driver sviluppati per gli strumenti utilizzati.

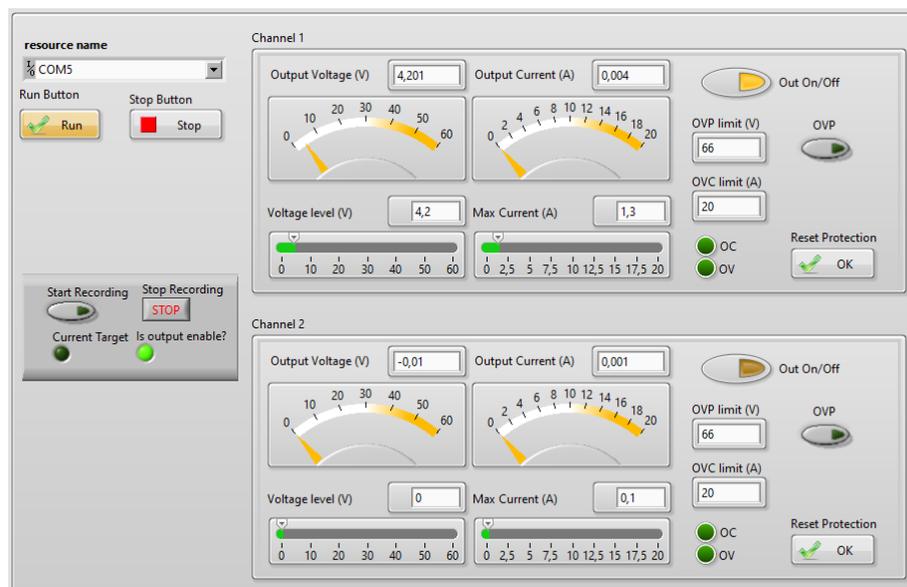
*Alimentatore Controllato*

Figura 69: Interfaccia LabView dell'alimentatore controllato CPX400DP.

L'alimentatore CPX400DP comunica con il PC attraverso una comunicazione seriale basata sul protocollo USB. L'interfaccia di fig. 69 permette di settare il valore massimo di tensione e corrente su entrambe le uscite. Offre inoltre una comoda rappresentazione grafica sullo stato dell'alimentatore che comprende informazioni su tensioni e correnti erogate, ma anche sul suo stato di funzionamento.

Si ricorda che la carica della cella avviene nella prima fase a tensione costante e nella seconda a corrente costante, per poi interrompersi quando la corrente erogata arriva a 0.08 A. Per questo motivo è stato necessario introdurre nell'interfaccia di comando una sezione che si occupasse di monitorare la fase di carica e di interromperla al raggiungimento del target di corrente. Quest'interfaccia aggiuntiva ha anche il compito di memorizzare la tensione e la corrente assorbita dalla cella per poter in seguito diagrammarne gli andamenti.

*Carico Attivo*

Come l'alimentatore, anche il carico attivo Rigol DL300A comunica con il PC usando una comunicazione seriale. L'interfaccia di controllo di fig. 70 è stata realizzata specificatamente per questa applicazione. Non avendo a disposizione i driver LabView del dispositivo, lo scambio di dati avviene utilizzando il linguaggio ASCII. Infatti il carico elettronico mette a disposizione stringhe di codice, che corrispondono all'esecuzione di specifiche istruzioni, alla lettura di un dato o ad un pulsante del pannello frontale.

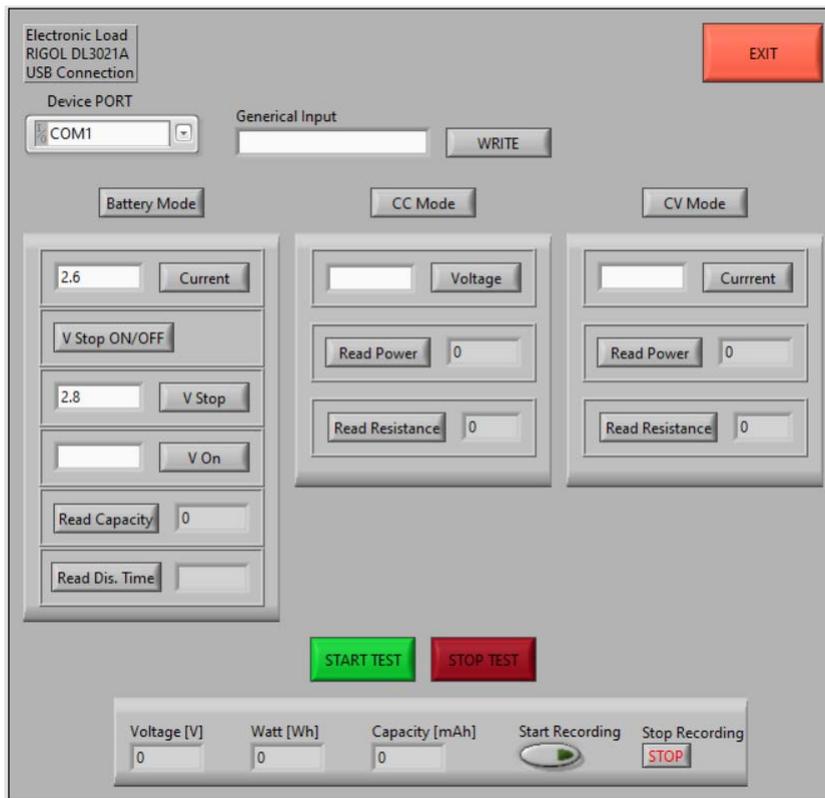


Figura 70: Interfaccia LabView del carico attivo DL300A

L'interfaccia è stata creata in modo tale che ogni pulsante attivi una routine che invia e riceve informazioni dal carico attivo. Durante i test di scarica la modalità utilizzata è stata la *Battery Mode* con una corrente variabile in funzione della velocità di scarica e una tensione di cut-off di 2.8 V.

Per rilevare i valori di tensione, energia e capacità, è stato creato un ciclo while parallelo con la precisa funzione di interrogare l'alimentatore ad intervalli di 2 s, per salvare poi i dati in un foglio Excel necessari per la successiva rielaborazione.

### *Spettroscopia*

L'interfaccia più complessa da realizzare è stata quella avente il compito di generare e acquisire i segnali e farne la FFT per determinarne la parte reale e immaginaria.

L'operazione di acquisizione e generazione dei segnali è stata affidata al cRio attraverso l'utilizzo di moduli esterni che implementano le funzioni di ADC e DAC.

Inizialmente, per facilità, si era deciso di utilizzare il cRio nella modalità di programmazione in real time, cioè utilizzando il processore dual core principale. Da misurazioni sperimentali si è osservato però che il dispositivo non era in grado di lavorare ad una frequenza di

campionamento superiore ai 5 kHz, inadeguata per l'applicazione che si doveva realizzare.

Pertanto, è stato necessario utilizzare la seconda modalità di funzionamento del cRio, ossia sfruttando la FPGA. Questa scelta ha comportato un aumento della difficoltà, dal momento che nella programmazione delle schede FPGA l'esecuzione del codice non avviene in modo sequenziale come nei microcontrollori, ma in parallelo. La difficoltà di programmazione della FPGA è stata compensata dalla possibilità di poter raggiungere delle frequenze di campionamento nell'ordine delle decine di kHz.

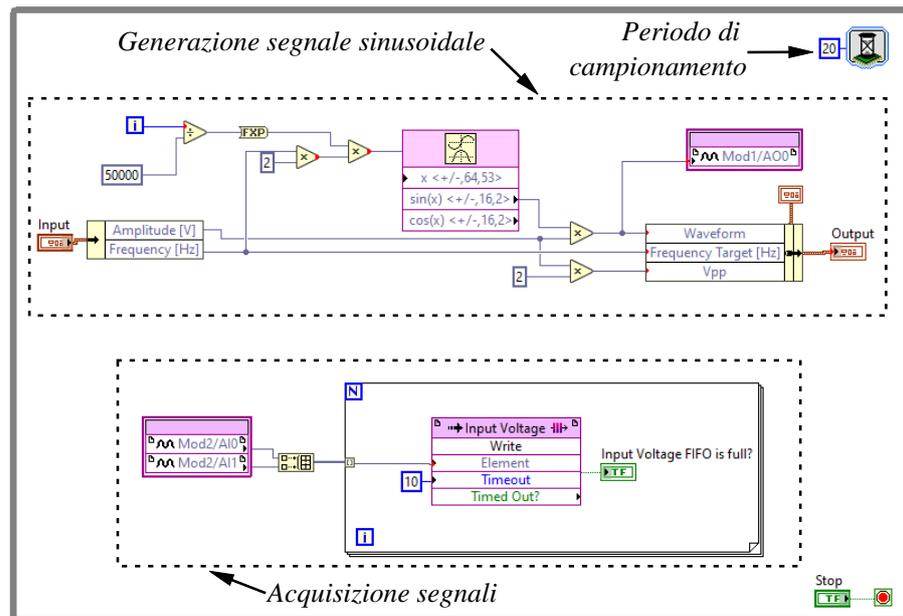


Figura 71: Interfaccia LabView FPGA I/O

In fig. 71 è riportato il diagramma a blocchi utilizzato in LabView per la programmazione della scheda FPGA del cRio.

Si osserva come tutte le istruzioni siano contenute all'interno di un ciclo while infinito, nel quale la distanza tra due iterazioni è di 20  $\mu$ s, corrispondenti ad una frequenza di campionamento di 50 kHz.

All'interno del ciclo while sono contenuti due blocchi di istruzioni che vengono eseguiti in parallelo.

Il primo si occupa delle generazione del segnale sinusoidale e come riferimenti in ingresso ha l'ampiezza e la frequenza del segnale da generare. Sono presenti dei blocchi moltiplicatori, poiché la formula per la generazione del segnale sinusoidale è:

$$v(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (30)$$

dove  $A$  è l'ampiezza e  $f$  la frequenza. Il tempo viene ricavato dividendo il numero delle iterazioni con una costante per ottenere un risultato in secondi. Ogni campione del segnale generato viene inviato

all'uscita analogica e ad un'interfaccia grafica per la sua visualizzazione.

Il secondo blocco nel ciclo while si occupa dell'acquisizione dei segnali analogici. In particolare, in questo caso si ha la necessità della lettura contemporanea di due valori di tensione. Dal momento che l'elaborazione dei segnali non viene eseguita nell'FPGA è necessario inviare i dati raccolti all'interfaccia principale. Questa operazione è svolta utilizzando una variabile di tipo FIFO (*First In First Out*), avente 262143 campioni e tipo di dato Floating Point a 16 Bit di cui 6 per la parte intera, 1 per il segno e i restanti per quella frazionaria.

Nell'interfaccia principale sono presenti una serie di cicli for e while annidati, con il preciso scopo di rendere il test automatico e salvare i risultati in un file Excel. I campioni raccolti vengono letti dalla memoria FIFO, ne viene fatta la trasformata di Fourier, dalla quale si determina la parte reale e immaginaria. Questa operazione viene eseguita in modo automatico per ogni valore di frequenza del quale si vuole conoscere la risposta del sistema.

#### 4.5 PROGETTAZIONE DELLA SCHEDA DI CONTROLLO

Avendo scelto di non utilizzare uno spettroscopio per la misura d'impedenza, è stato necessario pensare ad un setup sperimentale con cui eseguire questa misurazione. Inizialmente si era pensato di utilizzare l'alimentatore programmabile, ma è stato subito scartato perché non offriva una sufficiente banda passante.

Tra le varie alternative si era optato per un convertitore buck, ma per le motivazioni precedentemente discusse è stato scartato.

La scelta è ricaduta infine nell'amplificatore TDA7294 che trova largo impiego in campo audio. È un amplificatore tensione-tensione che può lavorare sia in configurazione non invertente che invertente. È in grado di erogare, con la tensione di alimentazione massima, una potenza fino a 100 W più che sufficiente per produrre una corrente di eccitazione nella batteria.

Il corretto funzionamento dell'amplificatore TDA7294 è condizionato dalla presenza di un insieme di circuiti esterni che, oltre a stabilizzare la tensione di alimentazione, svolgono ulteriori funzioni come la retroazione dell'uscita. Nel mercato non si trovano delle *evaluation board* con inglobato il TDA7294, se non per applicazioni audio. Di conseguenza è stato necessario lo studio, la progettazione e la realizzazione di una psb focalizzata all'utilizzo della stessa per la misura d'impedenza.

Avendo avuto completa libertà nella progettazione della scheda, si è deciso di inserire dei componenti aggiuntivi, non strettamente necessari al funzionamento del TDA7294, ma utili al fine di rendere più precisa e automatica la misurazione dell'impedenza.

La psb progettata non ingloba al suo interno il solo amplificatore audio per l'eccitazione di corrente, ma è diventata il centro di controllo delle prove sperimentali, in quanto sono stati aggiunti un insieme di componenti che hanno la funzione di interfacciarsi con la strumentazione esterna, come il carico attivo o l'alimentatore programmabile. Una schematizzazione della struttura della psb è riportata in fig. 72.

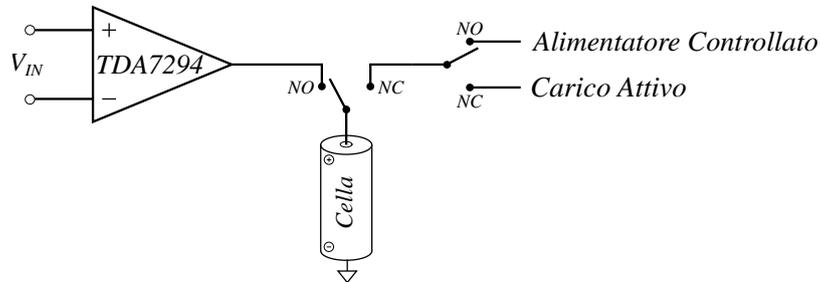


Figura 72: Struttura della scheda elettronica progettata.

Avendo deciso di rendere la scheda realizzata il centro delle prove sperimentali, è stato necessario aggiungere due relè monostabili SPDT *Single Pole Double Throw* con la la funzione di collegare la cella all'amplificatore, all'alimentatore programmabile o al carico attivo in funzione della prova che si deve effettuare.

#### 4.5.1 Progettazione del circuito di amplificazione

Per la progettazione del circuito di amplificazione contenente il TDA, si sono seguite le indicazioni riportate nel datasheet del prodotto, dove si consiglia di utilizzare l'amplificatore operativo interno al TDA7294 in modalità non invertente e con un guadagno minimo di 25 dB. Si ricorda come il guadagno di un operazionale sia dato dalla relazione:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (31)$$

con  $R_1$  resistenza nel ramo diretto e  $R_2$  resistenza nel ramo in retroazione.

L'ingresso in tensione dell'amplificatore è collegato all'uscita analogica del cRio avente  $\pm 10$  V di ampiezza massima. Per questo motivo non ci sono ragioni che giustifichino il fatto di amplificare il segnale di tensione in ingresso. Di conseguenza la scelta di  $R_1$  e  $R_2$  è stata fatta in modo tale da ottenere il minimo guadagno possibile,  $R_1 = 1$  k $\Omega$  e  $R_2 = 20$  k $\Omega$  a cui corrisponde un  $A_v$  di 26.44 dB.

Essendo il TDA7294 un amplificatore tensione-tensione e ricordando che il suo utilizzo è spiegato dalla necessità di iniettare una corrente di perturbazione della cella, è stato necessario porre all'uscita dell'amplificatore una resistenza di potenza di 2  $\Omega$  in modo tale da

trasformare la tensione in corrente. La necessità di utilizzare una resistenza di potenza nasce dal fatto che essa deve essere in grado di dissipare una potenza superiore al *Watt* non dissipabile dalle più diffuse resistenze smd.

Come si osserva da fig. 72, l'uscita del TDA7294 è collegata direttamente al terminale positivo della batteria. Affinché questo collegamento si possa realizzare, si dovrebbe inserire un filtro passa alto in modo da isolare la componente continua in tensione della batteria dal segnale sinusoidale. Supponendo che la frequenza minima del segnale di perturbazione sia di 1 Hz e posizionando la frequenza di taglio del filtro una decade prima, cioè ad 0.1 Hz, si otterrebbe un condensatore avente una capacità di 800 mF che porterebbe alla necessità di dover utilizzare un considerevole numero di condensatori posti in parallelo.

Per ragioni d'ingombro nella psb si è scartata la possibilità di utilizzare i condensatori in parallelo all'uscita preferendo seguire un'altra strada.

La soluzione adottata è stata trovata nel mondo audio, dove viene utilizzato un circuito denominato "DC Servo" per eliminare l'offset di errore dall'uscita degli amplificatori. Questo evita l'utilizzo di condensatori che provocherebbero un inevitabile shift di fase con ripercussioni dannose sulla qualità del suono. Lo schema di un generico DC Servo è riportato in fig. 73; si compone di un ulteriore amplificatore che può essere invertente o non invertente con una configurazione circuitale tale da farlo funzionare come integratore. L'uscita del servo si somma con l'ingresso dell'amplificatore principale facendone traslare l'uscita fino ad annullare l'offset in continua. Nel caso in cui per il DC Servo si utilizzasse un amplificatore in configurazione invertente, il morsetto non invertente dovrà essere collegato al riferimento zero e quindi in massa.

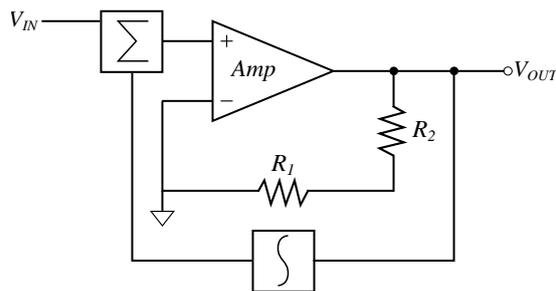


Figura 73: Schema di funzionamento del DC Servo

La funzione svolta dal DC Servo nella psb non è di eliminare la componente in continua, bensì alzare la tensione di uscita dell'amplificatore al valore di tensione in continua della batteria. Si realizza questa funzione connettendo il morsetto non invertente dell'operazionale al terminale positivo della batteria.

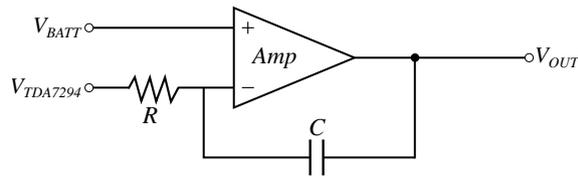


Figura 74: DC Servo non invertente progettato

Particolare attenzione deve essere posta nella progettazione del circuito d'integrazione del DC Servo. La tensione di uscita del DC Servo riportato in fig. 74 è:

$$V_{OUT} = V_{BATT} + \int \frac{V_{BATT} - V_{TDA7294}}{CR} dt \quad (32)$$

dove la pulsazione di taglio è  $\tau = 1/RC$  e, dal momento che il DC Servo ha solo la funzione di compensare la componente in continua della batteria, deve essere fissata ad un valore tale da non attenuare il segnale del TDA7294. Supponendo che la minima frequenza del segnale di perturbazione sia di 1 Hz e decidendo di fissare la frequenza di taglio almeno una decade prima di trova che  $C=100 \mu F$  e  $R=100 k\Omega$  a cui corrisponde una  $f_t$  di 0.015 Hz.

Sfruttando il DC Servo, è stato realizzato un partitore di tensione a guadagno variabile e posto all'ingresso del TDA7294. Ciò permette di avere un certo grado di libertà nella scelta dell'ampiezza del segnale di perturbazione generato dal cRio.

Per verificare il funzionamento dell'amplificatore, è stato utilizzato LTSpice con un modello che imita il funzionamento del TDA7294. La progettazione della scheda è stata fatta avvalendosi dei risultati simulativi ottenuti in questo ambiente di simulazione.

In fig. 75 sono riportati tre grafici: il primo rappresenta l'uscita del cRio e di conseguenza l'ingresso dell'amplificatore. È un segnale sinusoidale di ampiezza 1 V e frequenza 1 Hz. Nel secondo grafico è riportata l'uscita dell'amplificatore: si nota come per effetto del DC Servo sia presente un offset in DC pari a 4.2 V pari alla tensione della cella. Infine, nel terzo grafico, viene visualizzata la corrente iniettata nella batteria, la sua ampiezza è ottenuta prendendo la tensione del grafico precedente, togliendo la componente media e dividendo il risultato per il valore della resistenza di potenza, in modo dettagliato:

$$I_{OUT} = \frac{V_{IN} \cdot A_p \cdot A_v}{R} = \frac{1 \cdot \frac{0.5}{20+0.5} \cdot 21}{2} = 0.256 mA \quad (33)$$

dove  $A_p$  e  $A_v$  sono rispettivamente i guadagni del partitore di tensione e del TDA7294.

Osservando con attenzione fig. 75, si nota come il segnale di ingresso e quello in uscita siano leggermente sfasati. Questo è dovuto al condensatore di filtro presente all'ingresso, utile per eliminare even-

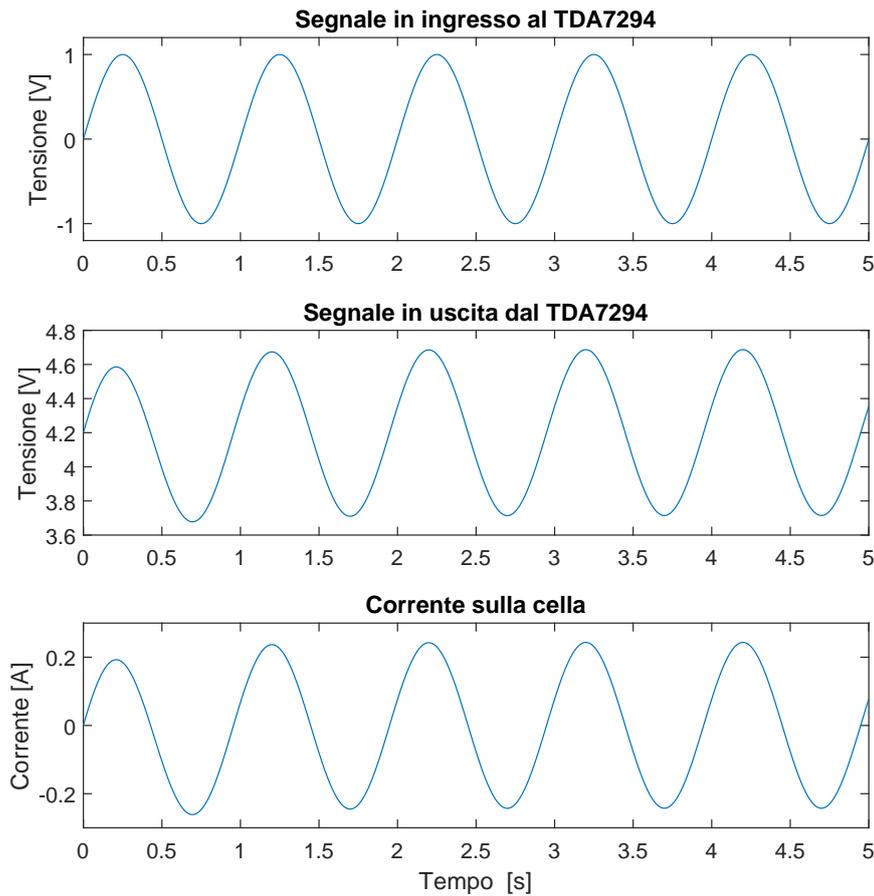


Figura 75: Funzionamento del TDA7294 a fronte di un ingresso sinusoidale con  $V_{pp}=2\text{ V}$  e frequenza di 1 Hz.

tuale componente in continua dal segnale proveniente dal cRio, che altrimenti verrebbe amplificata.

Il DC Servo presenta un tempo di risposta non nullo, da intendersi come l'intervallo temporale in cui l'uscita del TDA7294 ha un offset diverso dalla tensione della cella. In questo lasso di tempo la corrente iniettata nella cella può essere molto elevata e dipende dalla tensione di alimentazione del TDA7294 che, a sua volta, è funzione della potenza da erogare. Questo fenomeno è rappresentato in fig. 76: si osserva come il DC Servo presenti un tempo di risposta di circa 10 s durante i quali vengono erogati nella batteria 2 A.

Per risolvere questo problema si potrebbe diminuire il tempo di risposta del DC Servo, cioè ridurre la sua costante di tempo, questo corrisponde ad un aumento della frequenza di taglio. Quindi, la scelta dei valori della rete RC è un trade-off tra attenuazione e ritardo.

La soluzione adottata è stata di inserire un relè che commutasse l'uscita del TDA7294 sulla cella soltanto quando il DC Servo è a regime, cioè nel momento in cui il DC offset all'uscita dell'amplificatore corrisponde con la tensione in continua nella batteria. In questo modo si evita che correnti elevate possano essere iniettate nella cella.

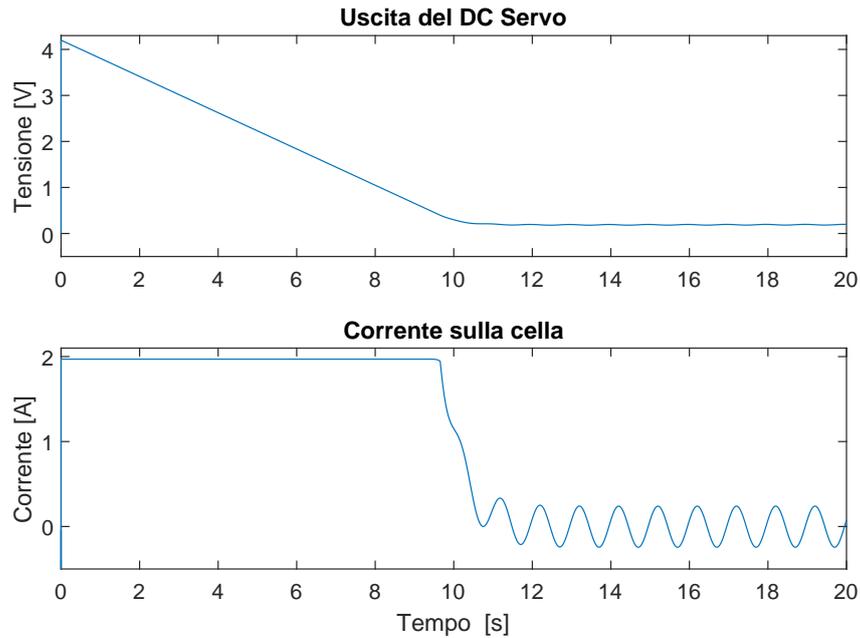


Figura 76: Andamento della tensione del DC Servo riferita a massa e della corrente iniettata nella cella durante il transitorio di avvio del DC Servo.

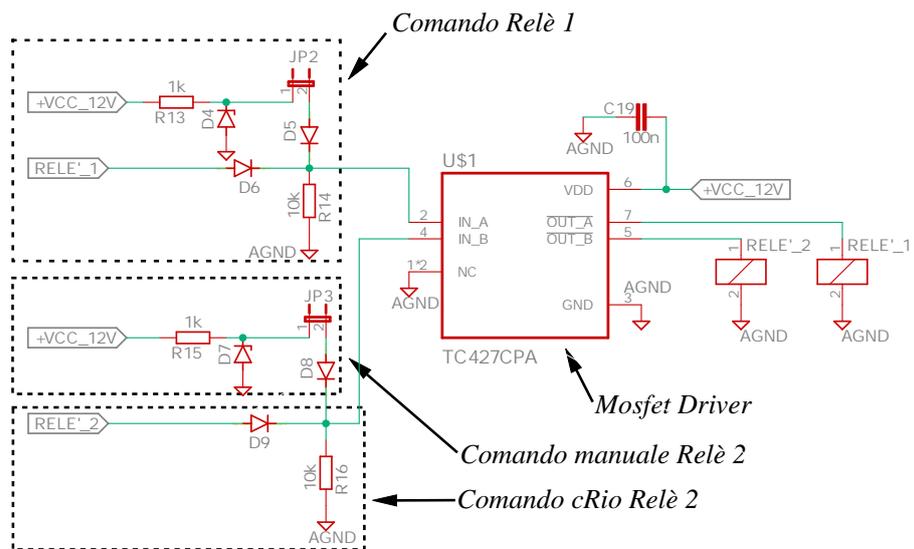


Figura 77: Schema di pilotaggio dei relè.

Un secondo relè è stato aggiunto per permettere di collegare la cella o all'alimentatore programmabile o al carico attivo in funzione del test che deve essere eseguito. In fig. 77 è riportato lo schema del circuito di pilotaggio dei relè. Il comando viene generato attraverso un'uscita digitale del cRio o manualmente, agendo su un interruttore posto nella scheda. I relè ricevono il segnale di comando in uscita dal mosfet driver TC427 che è in grado di erogare una corrente tale da mantenere eccitate entrambe le bobine dei due relè contemporaneamente.

Lo schematico dell'amplificatore TDA7294 è riportato in fig. 78: si nota che la retroazione e il DC Servo sono posti rispettivamente sopra e sotto all'amplificatore.

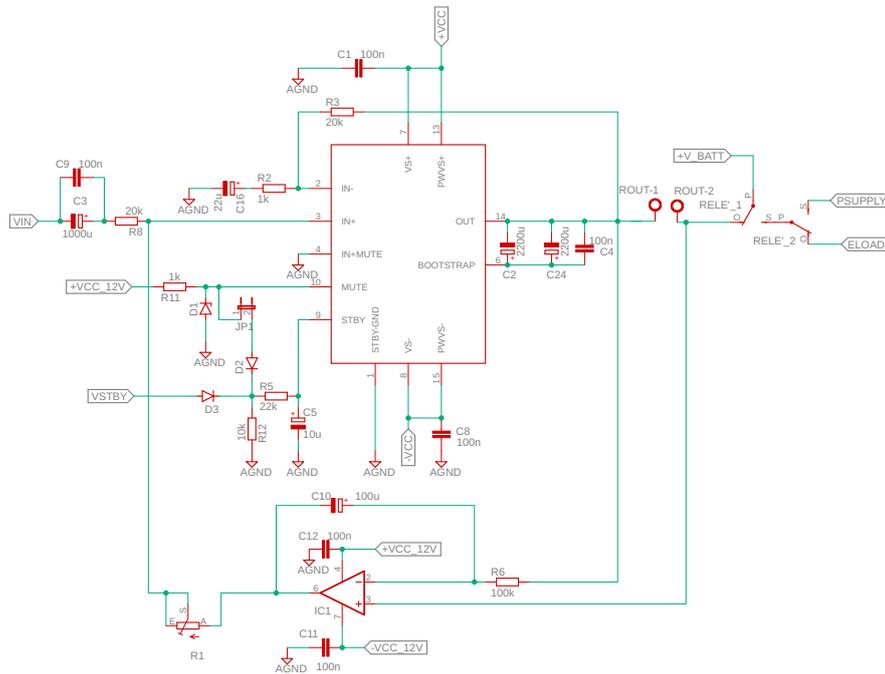


Figura 78: Schematico blocco di amplificazione TDA7294.

Essendo il TDA7294 progettato per applicazioni audio, ci sono a disposizione due ulteriori ingressi: muto e stand-by. Il loro funzionamento in termine di tensione in uscita è del tutto comparabile in quanto entrambi la inibiscono, l'unica differenza è nella corrente di quiescent; nel caso dello stand-by è zero mentre con il muto attivo è di qualche mA. Nel datasheet del TDA7294 è riportato che le funzioni di muto e stand-by sono disabilitate quando l'ingresso al corrispettivo terminale si trova una tensione di almeno 5 V. Si è scelto di mantenere il muto sempre disattivo e i 5 V sono stati creati utilizzando un diodo zener.

Si è optato di utilizzare lo stand-by per disabilitare in modo temporaneo l'uscita del TDA7294. Anche in questo caso il comando può essere dato in modo manuale, attraverso un interruttore posto nella pcb o utilizzando l'uscita digitale del cRio. La disabilitazione dell'amplificatore è utile nel caso in cui si voglia misurare la tensione in continua della cella, in quanto per ottenere una valore affidabile, la misurazione deve essere fatta solo dopo un certo periodo di riposo.

Nell'ingresso *bootstrap* sono stati posti due condensatori da 2200 µF poiché nel datasheet del TDA7294 consigliano di inserire condensatori di capacità elevata se si vuole avere poca distorsione alle basse frequenze. Nello schema presente nel datasheet, era inserito un solo condensatore da 22 µF in quanto l'amplificatore nasce per il settore

audio, dove raramente ci sono segnali ad una frequenza inferiore ai 20 Hz.

#### 4.5.2 Sensore di corrente

Affinché si possa eseguire la spettroscopia, è necessario misurare la corrente che viene iniettata nella cella. Inizialmente si era pensato di eseguire questa misurazione utilizzando una sonda LEM esterna da collegarsi al cRiO attraverso un connettore BNC. Durante le fasi di progettazione, allo scopo di integrare tutte le periferiche in un'unica psb, si è deciso di utilizzare un sensore LEM. La scelta è ricaduta nel LEM LAH 25-P, un trasduttore di corrente ad anello aperto che sfrutta l'effetto Hall con una piedinatura adatta all'utilizzo su psb.

Esso è in grado di misurare una corrente fino a 25 A con una accuratezza di  $\pm 0.25\%$  sul valore della corrente nominale e presenta una banda passante a  $-1$  dB di 200 kHz. Nella resistenza di Shunt, il cui valore dipende dalla tensione di alimentazione del LEM, si genera una differenza di potenziale proporzionale alla corrente che circola nel circuito primaria secondo il rapporto 1:2000.

Nella psb si è scelta una resistenza di 200  $\Omega$ , così facendo si ottiene una risoluzione di 100 mV/A.

#### 4.5.3 Amplificatore per strumentazione

Supponendo un'eccitazione di corrente di valore minimo pari a 0.1 A e un'impedenza della cella di 0.05  $\Omega$ , si otterrebbe una risposta in tensione di valore massimo 0.005 V, troppo piccola per poter essere misurata con precisione. Da qui la necessità di utilizzare un amplificatore al cui ingresso è presente un filtro passa alto che serve per eliminare la componente continua di tensione della batteria, che non deve essere amplificata.

Inizialmente si era stabilito di adoperare un amplificatore differenziale; tuttavia, la necessità di avere alti guadagni si scontrava con l'esigenza di posizionare la frequenza di taglio del filtro passa alto il più in basso possibile, rendendo l'amplificatore differenziale non adatto.

Per questa ragione si è stato impiegato l'amplificatore per strumentazione INA217 il cui schematico è riportato in fig. 79. Presenta un banda passante di 800 kHz quando il guadagno, fissato attraverso l'utilizzo di un resistore esterno,  $R_{\text{GAIN}}$ , è pari a 100.

Il guadagno dell'amplificatore è dato dalla relazione:

$$G = 1 + \frac{10\text{k}\Omega}{R_{\text{GAIN}}} \quad (34)$$

Avendo fissato un guadagno di 100, si ottiene che  $R_{\text{GAIN}}$  dovrebbe essere 101.0101  $\Omega$ . Ottenere il valore esatto è impossibile, non solo

per la reperibilità delle resistenze, ma anche per effetto dell'intrinseca incertezza con cui è noto il valore della resistenza. Di conseguenza sono state selezionate due resistenze, la prima da  $68\ \Omega$  e la seconda da  $33\ \Omega$ .

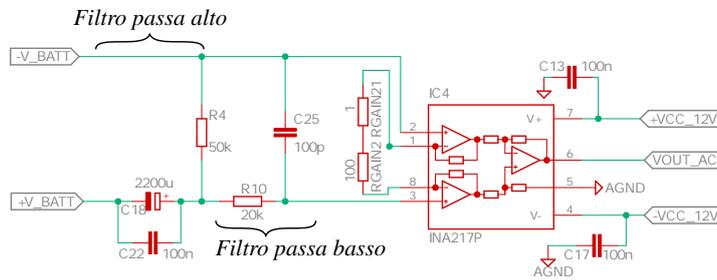


Figura 79: Amplificatore di strumentazione con filtro passa basso e passa alto.

Non avendo più la necessità di un trade-off tra il guadagno e la banda passante del filtro passato alto, si è potuta scegliere una frequenza di taglio molto bassa,  $0.0014\ \text{Hz}$ . Così facendo si ottiene un quasi trascurabile ritardo tra ingresso e uscita anche a fronte di segnali sinusoidali a bassa frequenza. Da fig. 79 si nota come sia presente anche un filtro passa basso: il suo inserimento è stato necessario per attenuare i rumori ad alta frequenza e la sua frequenza di taglio è stata fissata a  $79.6\ \text{kHz}$ .

Combinando il passa alto e il passa basso si crea un filtro passa banda.

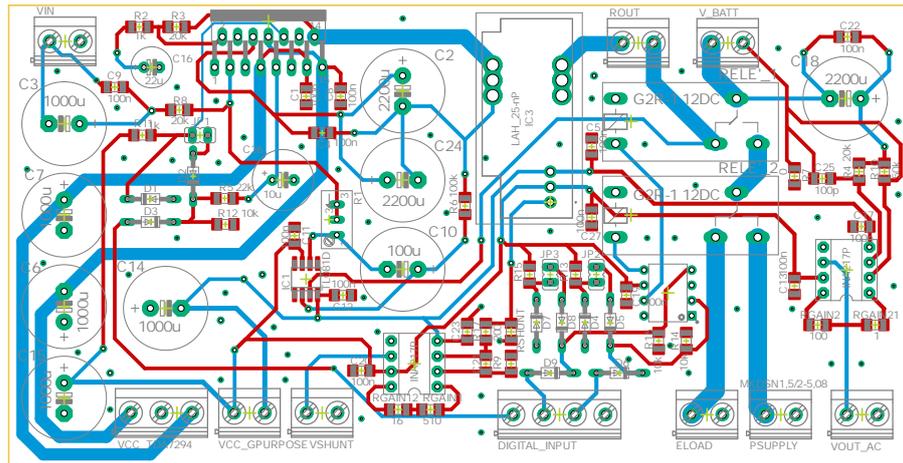
Un secondo amplificatore per strumentazione lo si è applicato nella resistenza di Shunt del sensore di corrente, dal momento, avendo una risoluzione di  $100\ \text{mV/A}$ , il segnale di tensione risulta essere molto piccolo. In questo caso non è stato necessario usare un passa alto per eliminare la componente in continua, ma si è utilizzato solo un passa basso, avente la stessa frequenza di taglio del precedente ed impiegato per lo stesso motivo.

Questo amplificatore per strumentazione è stato settato ad un guadagno di 20, ottenuto utilizzando una resistenza da  $510\ \Omega$  e  $16\ \Omega$ .

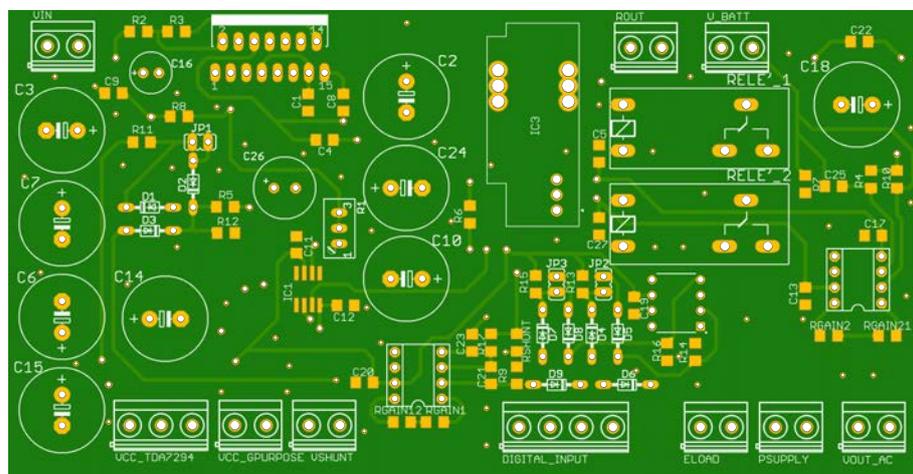
#### 4.5.4 Scheda elettronica progettata

La psb, (fig. 80), è stata realizzata utilizzando il programma di progettazione elettronica Eagle®. La scheda è composta da due layer: nel primo sono disposti tutti i componenti, mentre le piste si trovano su entrambi. Questa scelta ha permesso di semplificare e compattare la disposizione dei componenti, dal momento che si è potuto passare tra un layer e l'altro come si riteneva più opportuno.

Come è possibile osservare dagli schematici di fig. 78 e 79, nei terminali di alimentazione sono presenti dei condensatori non elettrolitici, che hanno la funzione di stabilizzare la tensione di alimenta-



(a) Struttura della psb con i componenti e le piste dei due layer.



(b) Render grafico di come appare la psb

Figura 80: Psb realizzata con il programma di progettazione elettronica Eagle® .

zione. Essi devono essere posti subito in prossimità dei terminali di alimentazione degli amplificatori in modo tale da rendere minime le induttanze parassite delle piste.

Nei condensatori elettrolitici di grande dimensione ( $>1 \mu\text{F}$ ), è stato posto in parallelo un condensatore smd per migliorarne il comportamento alle alte frequenze.

Nella scheda elettronica si possono osservare come siano presenti molti vias, usati per mettere in comunicazione il layer superiore con quello inferiore. Essi hanno la funzione di facilitare il ritorno della corrente in massa e di conseguenza abbassare l'effetto di disturbo dovuto alle induttanze parassite.

Nella psb sono a disposizione un totale di 10 morsetti, così suddivisi:

1.  $V_{IN}$ : è l'ingresso collegato al cRio da cui proviene il segnale di tensione che dovrà essere eccitato;

2. **V<sub>CC</sub>TDA7294**: sono i terminali dedicati alla sola alimentazione del TDA7294 con una tensione massima di 50 V;
3. **V<sub>CC</sub>G<sub>purpose</sub>**: terminali di alimentazione per tutti quei dispositivi, ad esclusione del TDA7294, che devono essere alimentati. Sono collegati i due amplificatori per strumentazione, i due relè, il LEM per la misura della corrente e l'amplificatore che svolge la funzione di DC Servo. In genere la tensione in questi terminali non eccede i 12 V;
4. **V<sub>SHUNT</sub>**: questo punto si collega con l'ingresso analogico del cRio e serve per la misura della tensione amplificata della resistenza di Shunt, proporzionale alla corrente;
5. **Digital Input**: uscita del modulo digitale del cRio, viene utilizzato per comandare i relè e il circuito di stand-by del TDA7294. La tensione a cui corrisponde il valore booleano "ON" è 5 V;
6. **Electronic Load**: punto di collegamento tra i terminali della cella e il carico attivo per la fase di scarica a corrente costante;
7. **Power Supply**: terminali per il collegamento al caricatore programmabile;
8. **V<sub>OUTac</sub>**: terminali per la lettura della tensione della cella generata dalla perturbazione di corrente. Essi sono collegati con l'ingresso analogico del cRio;
9. **V<sub>BATT</sub>**: terminali che si collegano con il case contenente la cella. Da esse è possibile rilevare la tensione in continua della batteria quando non è sotto carico;
10. **R<sub>OUT</sub>**: punto di collegamento con la resistenza di potenza. Si è deciso di non inglobare questa resistenza nella psb, in quanto deve dissipare una potenza che è proporzionale alla corrente di eccitazione. Di conseguenza, è preferibile collegare la resistenza stessa a un dispositivo di dissipazione.



## PROVE SPERIMENTALI

---

In questo capitolo verranno riportati e commentati i risultati delle prove sperimentali eseguite.

Una prima sequenza di prove verrà utilizzata per caratterizzare le prestazioni della cella. In particolare si tracciano gli andamenti di tensioni e correnti durante le fasi di carica e scarica. I risultati che si otterranno saranno utilizzati come base di partenza per i successivi test d'invecchiamento.

Seguiranno una serie di test per la stima della resistenza ohmica della batteria e una relazione statica tra il SOC e la tensione a circuito aperto.

Completate le fasi di caratterizzazione, si verificherà il corretto funzionamento dell'algoritmo sviluppato in LabView per l'esecuzione automatica della spettroscopia. Ne verrà testato il comportamento in un semplice circuito passa basso del primo ordine con il fine di determinarne il diagramma di Bode.

Tutte le prove sono state eseguite ad una temperatura ambientale di circa 20 °C.

### 5.1 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI BASE

Le prove di base hanno lo scopo di determinare o confermare le specifiche della cella riportate nel datasheet. Sono fondamentali, perché le informazioni ricavate saranno utilizzate come base di partenza per i successivi test.

#### 5.1.1 *Carica*

La prima prova eseguita è la fase di carica della batteria. La cella ICR18650-26JM permette due modalità di carica: la standard con una corrente massima di 1.3 A e quella veloce a 2.6 A, pari alla corrente nominale di scarica.

In fig. 81 sono riportati gli andamenti di tensione e corrente durante la fase di ricarica. Essa è composta da una fase in cui si inietta una corrente costante, seguita, al raggiungimento della tensione di 4.2 V, da una fase a tensione costante fino al completamento della carica. Si è scelto di interromperla quando la corrente assorbita dalla cella raggiunge il valore di 0.08 A.

Nel datasheet della ICR18650-26JM è indicato un tempo di ricarica di 3 h per la ricarica standard e 2.5 h per quella veloce, valori confermati in modo quasi esatto anche durante le prove sperimentali. La

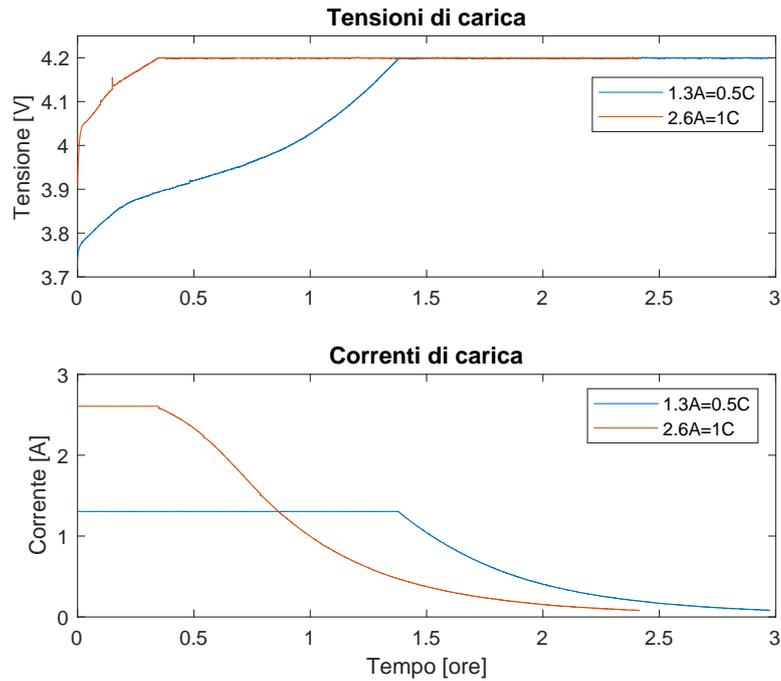


Figura 81: Tensioni e correnti durante la fase di carica composta da una fase a corrente costante seguita da una a tensione costante.

differenza tra i due metodi di ricarica consiste nella massima corrente assorbita dalla cella. Questo comporta che la tensione di 4.2 V viene raggiunta più rapidamente, generando una fase a corrente costante più lunga.

In fig. 81 si nota come le tensioni di inizio carica siano molto diverse. Questo non è dovuto ad una differente condizione iniziale, dato che entrambi gli andamenti sono stati ottenuti successivamente ad una prova di scarica di egual parametri. La differenza dipende dal fatto che la cella presenta una  $R_{ohm}$  che causa una differenza di potenziale ai suoi capi, proporzionale alla corrente. Nel caso della ricarica veloce a 2.6 A il salto ohmico è di due volte maggiore rispetto alla carica con 1.3 A, causando quindi una tensione di inizio carica più elevata. La presenza di  $R_{ohm}$  spiega anche perché le tensioni di inizio carica siano molto distanti dalla tensione assunta come quella di cella completamente scarica.

In una cella ideale si vorrebbe  $R_{ohm}$  il più bassa possibile per due motivi: primo per una ragione di efficienza, in quanto la potenza dissipata è  $R \cdot I^2$ . Quindi minore sarà la resistenza, minore sarà la potenza dissipata e il calore generato per effetto Joule durante la carica, comportando un più blando invecchiamento alla cella. La seconda motivazione dipende da una diminuzione dei tempi di carica,  $R_{ohm}$  piccola permette di allungare la fase a corrente costante dal momento che, avendo una minore caduta di potenziale, la tensione di 4.2 V la si raggiunge più lentamente.

In fig. 82 è riportata la capacità caricata in funzione del tempo per le due modalità di ricarica. Gli andamenti sono stati ottenuti da:

$$C = \frac{1}{3600} \int_0^{T_{TOT}} I_c dt \quad (35)$$

dove  $T_{TOT}$  è il tempo impiegato per la carica e  $I_c$  la corrente di carica.

Le curve sono composte da due zone: la prima, in cui si ha un aumento lineare della capacità dovuto alla corrente costante assorbita dalla batteria; nella seconda fase è presente un andamento non lineare, in quanto si ha una progressiva diminuzione della corrente fino al raggiungimento del valore di fine carica.

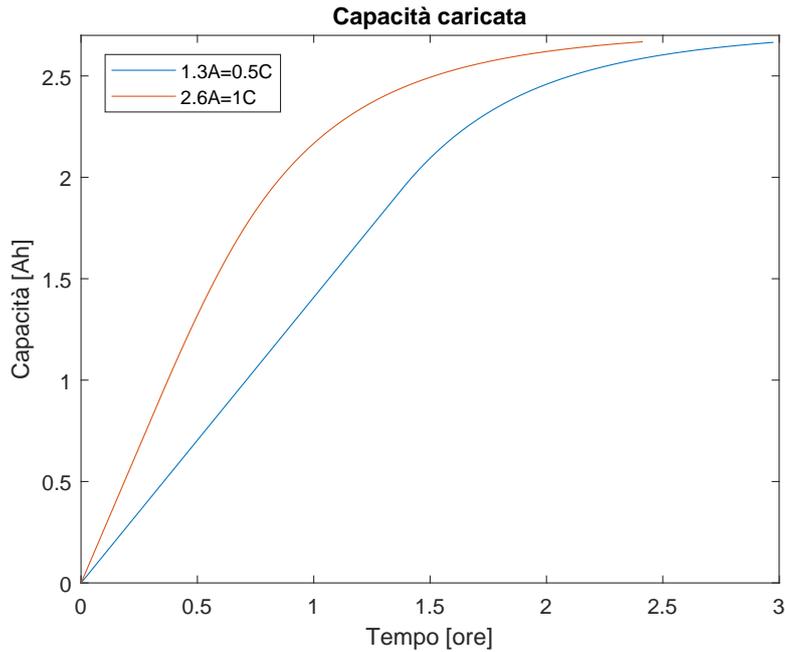


Figura 82: Andamento della capacità durante la fase di carica.

Nelle applicazioni dove sono richieste cariche ultra veloci si utilizzano delle celle che permettono di essere caricate dallo 0% all'80% in qualche decina di minuti. Dalle curve di fig. 81 e fig. 82 è possibile affermare che questa cella raggiunge l'80% dopo circa un'ora se caricata a 2.6 A, non rendendola adatta all'utilizzo in sistemi che necessitano di ricariche ultra fast.

### 5.1.2 Scarica

Il secondo aspetto preso in considerazione è la capacità scaricabile a corrente e temperatura costati. La relazione matematica che ne esprime il concetto è la (35), dove  $T_{tot}$  diventa il tempo totale impiegato per scaricare completamente la cella.

Le prove di scarica sono state interrotte a 2.8 V anche se la tensione di cut-off è di 2.75 V. Questo perché si è voluto evitare un possibile danneggiamento della cella.

Durante le prove la batteria è stata inserita in un case e collegata agli strumenti di banco attraverso dei cavi saldati. Questi collegamenti generano un aumento complessivo della resistenza ohmica, comportando l'aggravarsi dei problemi discussi in precedenza. Per eliminare l'aumento di resistenza dovuto alle resistenze di contatto si è sfruttato il fatto che il carico attivo mette a disposizione una modalità di funzionamento a quattro fili. Così facendo è stata eliminata la caduta di tensione provocata dal case contenente la cella.

In fig. 83 è riportato il risultato della prova di scarica a corrente costante.

Tutte le curve sono state ottenute con i medesimi parametri al contorno e dopo aver caricato la cella con una corrente costante di 1.3 A fino a quando la corrente assorbita ha raggiunto i 0.08 A.

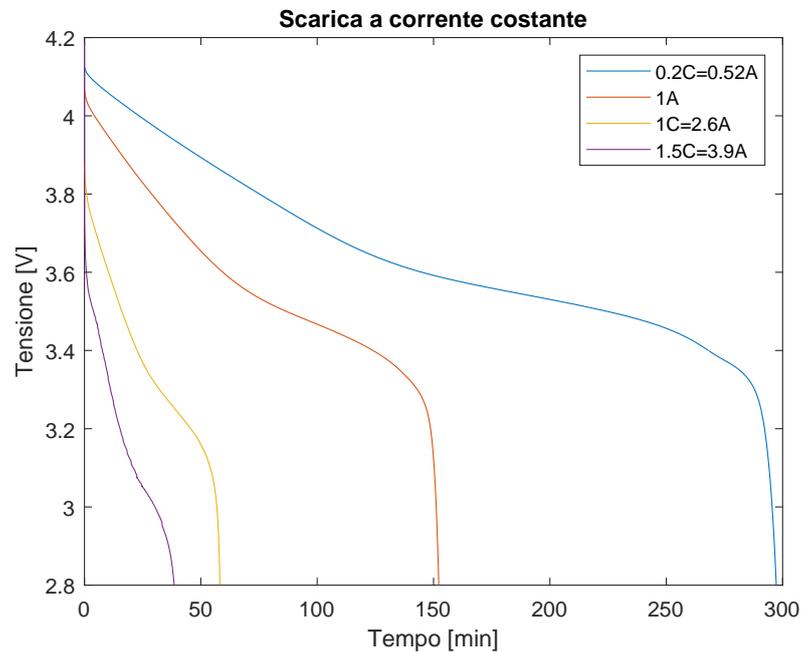


Figura 83: Grafico Tensione-Tempo della scarica a corrente costante fino alla tensione di cut-off pari a 2.8 V.

Come nel caso precedente, si osserva che la tensione di inizio scarica non è la medesima per le quattro prove eseguite, questo effetto è causato dalla presenza di  $R_{ohm}$ .

Nel datasheet viene riportato che la cella è in grado di erogare una corrente massima pari a 5.2 A. Tuttavia, per evitare l'eccessivo surriscaldamento della stessa, questa prova non è stata eseguita.

In fig. 84 è rappresentata la tensione in funzione della capacità. Si ricorda che la capacità nominale, riportata nel datasheet e ottenuta con una scarica a 0.2C, è di 2600 mAh.

Osservando il grafico di fig. 84, si può notare come al crescere dell'intensità di corrente la capacità estraibile, operando a corrente costante, diminuisce. Questo effetto è dovuto al *rate discharge effect* e

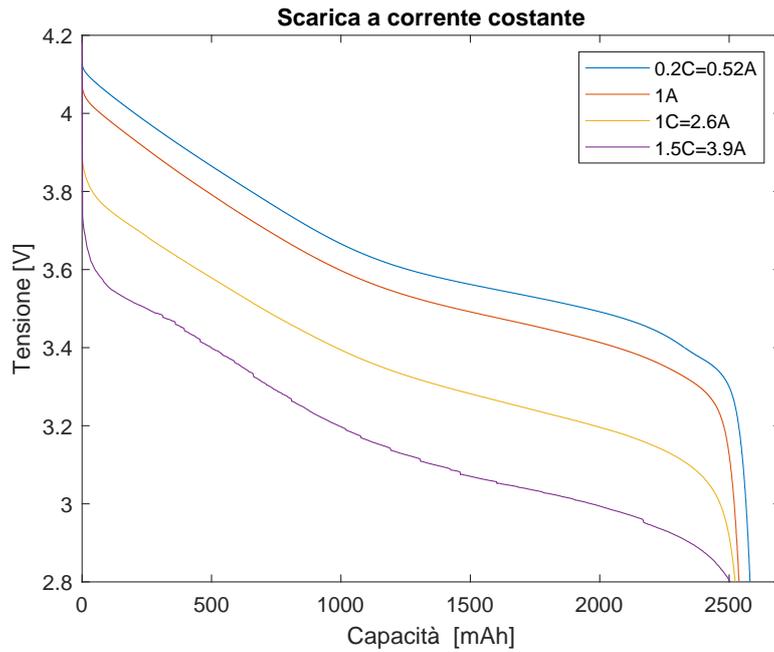


Figura 84: Grafico Tensione-Capacità della scarica a corrente costante fino alla tensione di cut-off pari a 2.8 V.

così, a parità di parametri e condizioni di lavoro, per correnti più elevate si raggiunge prima la tensione minima causata dalla maggiore caduta di potenziale sulla  $R_{ohm}$ , anticipando la fine della scarica.

Nel caso in cui, una volta giunti alla tensione di 2.8 V si decidesse di continuare la prova operando una scarica a tensione costante, la capacità che si otterrebbe sarebbe data dalla:

$$C_{CV} = \frac{1}{3600} \int_{T_{CC}}^{T_{TOT}} i(t) dt \quad (36)$$

dove  $T_{TOT} - T_{CC}$  è la durata della prova di scarica a tensione costante e  $i(t)$  la corrente erogata.

Si può dimostrare che, sommando la capacità ottenuta dalla prova a corrente costante con quella ottenuta dalla prova a tensione costante, la capacità della batteria assume sempre lo stesso valore. Questo dimostra come la capacità totale effettivamente estraibile sia indipendente dalla corrente di scarica.

Nelle prove sperimentali la scarica a tensione costante non è stata eseguita per salvaguardare lo stato di salute della cella. Come spiegato nel capitolo 3, è sempre sconsigliato scaricare completamente una batteria agli ioni di litio perché si rischia di causare un invecchiamento precoce.

Nelle operazioni di caratterizzazione è stata considerata anche l'energia effettivamente estraibile dalla cella. Essa è legata alla capacità in modo non lineare poiché, anche la tensione presenta tale andamento.

L'energia estraibile dalla cella è data da:

$$E_{cc} = \frac{1}{3600} \int_0^{T_{TOT}} v(t) \cdot Idt \quad (37)$$

Come in precedenza, è possibile definire con  $E_{cv}$  l'energia estraibile operando a tensione costante, una volta che si sia raggiunta la tensione di 2.8 V. Ma per le motivazioni sopra elencate, questa prova non è stata eseguita.

In fig. 85 sono riportati i grafici ottenuti dalla prova sperimentale: si osserva come l'energia estraibile dalla cella diminuisca all'aumentare della corrente di scarica, analogamente con quanto è avvenuto per la capacità.

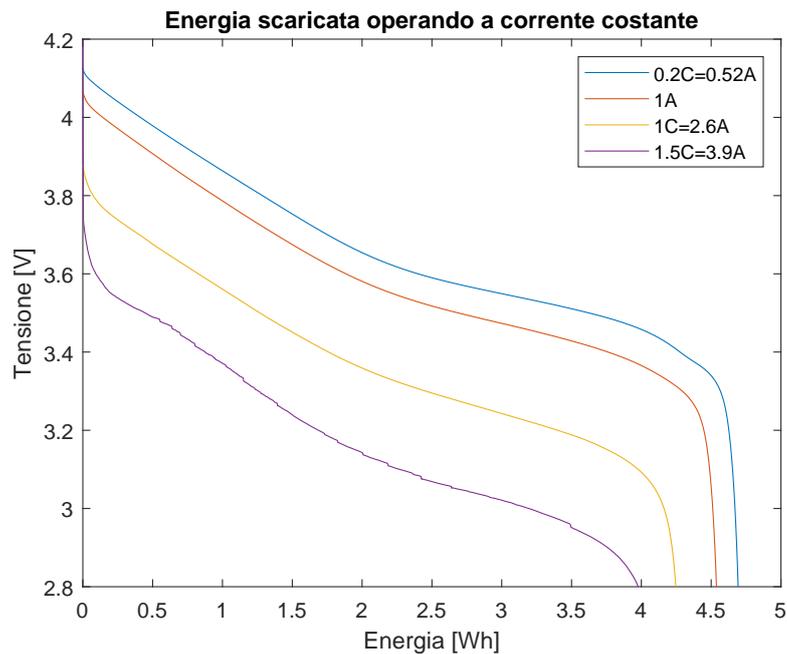


Figura 85: Grafico Tensione-Energia della scarica a corrente costante fino alla tensione di cut-off pari a 2.8 V.

In tab. 21 sono riassunti i risultati sperimentali ottenuti dalle prove di base per la caratterizzazione della cella.

Corrente	Tempo	Capacità	Energia
0.2C = 0.52 A	4 h e 57 min	2580 mAh	4.69 Wh
1 A	2 h e 32 min	2538 mAh	4.54 Wh
1C = 2.6 A	58 min	2520 mAh	4.25 Wh
1.5C = 3.9 A	38 min	2503 mAh	3.98 Wh

Tabella 21: Risultati ottenuti dalle prove di scarica per la caratterizzazione della cella ICR18650-26JM.

In precedenza si è affermato che la capacità complessiva estraibile dalla cella, data dalla somma di quella ottenuta a corrente e a tensione

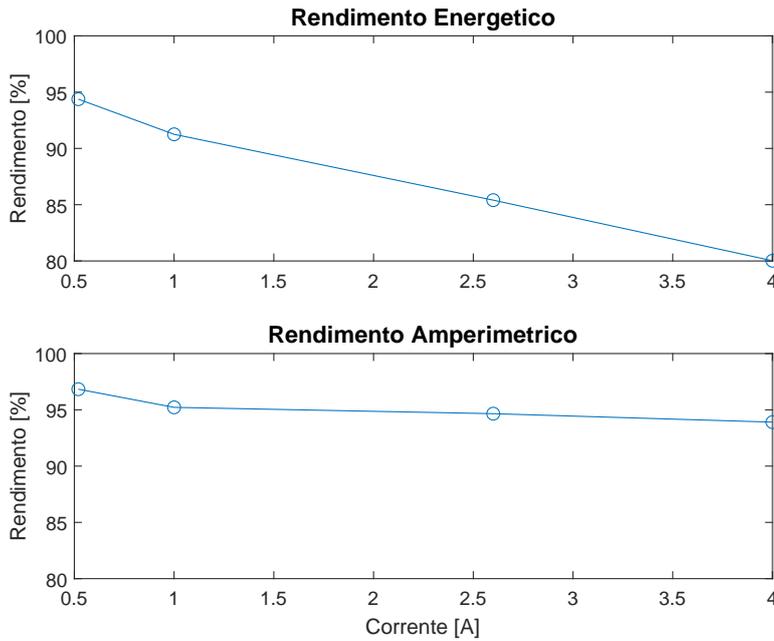


Figura 86: Rendimento energetico e amperometrico.

costante, rimane la medesima indipendentemente dalla corrente di scarica. Non si può affermare lo stesso per l'energia, poiché, se è vero che quella complessivamente estraibile è sempre ricavata dalla somma di due fasi, si può dimostrare che diminuisce all'aumentare della corrente.

Questo comportamento può essere spiegato con la seguente affermazione: la capacità è legata alla materia attiva della cella che non può diminuire se non per fenomeni d'invecchiamento e di conseguenza, se si estrae meno energia, sono aumentate le perdite. Nel processo di scarica queste possono essere rappresentate dall'energia dissipata per effetto Joule, che cresce con il quadrato della corrente. Infatti si è notato che al crescere della corrente di scarica aumentava di pari passo anche la temperatura superficiale della cella.

In fig. 86 sono riportati il rendimento energetico e amperometrico. Per rendimento energetico s'intende il rapporto tra l'energia scaricata nella prove a corrente costante, con quella caricata nella modalità standard (1.3 A). Il rendimento amperometrico è definito come il rapporto tra la capacità caricata e scaricata.

Se il rendimento energetico presenta un chiaro andamento decrescente dovuto all'energia dissipata per effetto Joule, quello amperometrico rimane pressoché costante in quanto, come affermato in precedenza, la capacità è legata alla materia attiva che rimane costante se non per effetto dell'invecchiamento.

### 5.1.3 Stima dei parametri

Il seguente lotto di prove ha lo scopo di determinare una serie di parametri che saranno utili per eseguire la spettroscopia in modo efficace.

Si ricorda che lo stato di carica SOC può essere definito come:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(0) + \frac{1}{C_{\text{rif}}3600} \int_0^t i(t) dt \quad (38)$$

Nel capitolo 3 si era utilizzata la notazione  $Q_{\text{disponibile}}$  al posto di  $C_{\text{rif}}3600$ , ma il significato rimane invariato.

La (38) fa capire come il SOC sia una grandezza relativa definita rispetto ad una capacità di riferimento. Normalmente come  $C_{\text{rif}}$  si assume la capacità nominale della batteria. Tuttavia, si è visto dalle prove svolte in precedenza, come la capacità estraibile non sia una grandezza costante ma dipenda dai parametri di lavoro della cella.

Di conseguenza, è possibile esprimere il SOC in funzione della capacità effettivamente estraibile nelle condizioni in cui essa opera. Affinché questa scelta risulti valida, sarebbe necessario eseguire una serie di prove di scarica facendo variare la corrente e la temperatura, al fine di costruire una mappa dove venga indicata, in funzione dei parametri di lavoro, la capacità estraibile dalla cella.

È chiaro come questa caratterizzazione sia di difficile esecuzione e potrebbe presentare qualche difetto non appena la corrente di scarica non fosse più costante ma variabile nel tempo.

Nelle successive prove sperimentali si è usato come capacità di riferimento quella ottenibile attraverso una scarica a  $0.2C$ , cioè  $0.52 A$ . È la medesima scelta adottata dal produttore per la redazione del datasheet.

Per i successivi grafici è stata usata una cella differente da quella utilizzata precedentemente. La capacità  $C_{\text{rif}}$  scelta come riferimento per il calcolo del SOC è  $2591 \text{ mAh}$ .

Ricordando gli schemi circuitali di fig. 48, l'elemento di cui è più facile trovarne il valore è  $V_{\text{OCV}}$ , cioè la tensione a circuito aperto o tensione a vuoto. Per la prova sperimentale volta a determinare la caratteristica  $V_{\text{OCV}}\text{-SOC}$ , è stato realizzato un programma in LabView che s'interfaccia con il carico attivo per le operazioni di scarica e con il cRio per la misura della tensione. Il tutto è stato eseguito in modo automatico ed ha avuto una durata di circa 5 h.

La prova sperimentale è stata preceduta da una carica standard della cella fino alla corrente di cut-off di  $0.08 A$ . Successivamente i passi eseguiti durante il test sono stati:

1. scarica a corrente costante a  $1 A$  per  $15 \text{ min}$  e  $9 \text{ s}$ ;
2. riposo di  $12 \text{ min}$ ;
3. rilevazione della tensione ai capi della cella.

Questa sequenza è stata ripetuta per dieci volte fino a quando il cRio ha rilevato una tensione di cella inferiore a 2.8 V e ha interrotto il test.

La scarica ad 1 A per 15 min e 9 s è stata eseguita in modo tale da scaricare il 10 % della capacità ad ogni ciclo. Infatti, moltiplicando la corrente per il tempo di scarica, si trovano 259.1 mAh equivalenti al 10 % di 2591 mAh.

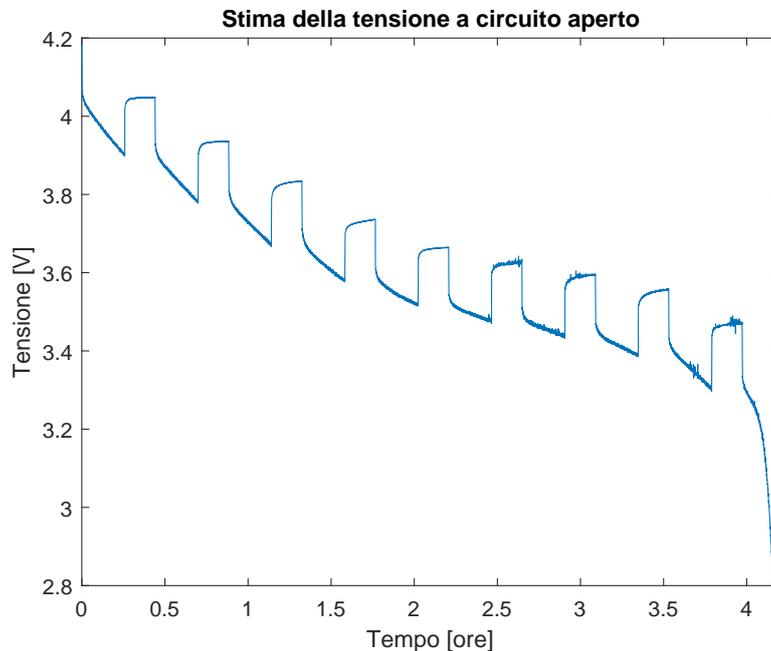


Figura 87: Andamento della tensione in funzione del tempo nella prova per la stima della  $V_{OCV}$  in funzione del SOC, la scarica è avvenuta con una corrente costante pari a 1 A.

In fig. 87 è rappresentato l'andamento della tensione in funzione del tempo. Si nota come durante il tempo di riposo la tensione non si assesta immediatamente ad un valore costante, ma presenta un certo andamento esponenziale. Il tempo di riposo serve appunto per attendere che la tensione della cella si trovi in una condizione di equilibrio.

La caratteristica  $V_{OCV}$ -SOC è riportata in fig. 88. È una funzione monotona crescente di natura non lineare dello stato di carica.

Si osserva come la tensione, a cui corrisponde un SOC dello 0%, non è la quella di cut-off ma 3.42 V. Questo avviene perché i 2.8 V si raggiungono solo quando la cella è sotto carico. Se anche a circuito aperto si avesse una tensione ai terminali di 2.8 V vorrebbe dire che sotto carico la cella presenterebbe una tensione molto più bassa rispetto a quella di cut-off, condizione che non si deve mai verificare, pena il danneggiamento della cella.

Continuando ad osservare fig. 88 si vede che la tensione a cui corrisponde un SOC del 100%, è 4.185 V, leggermente inferiore a quella massima ammissibile.

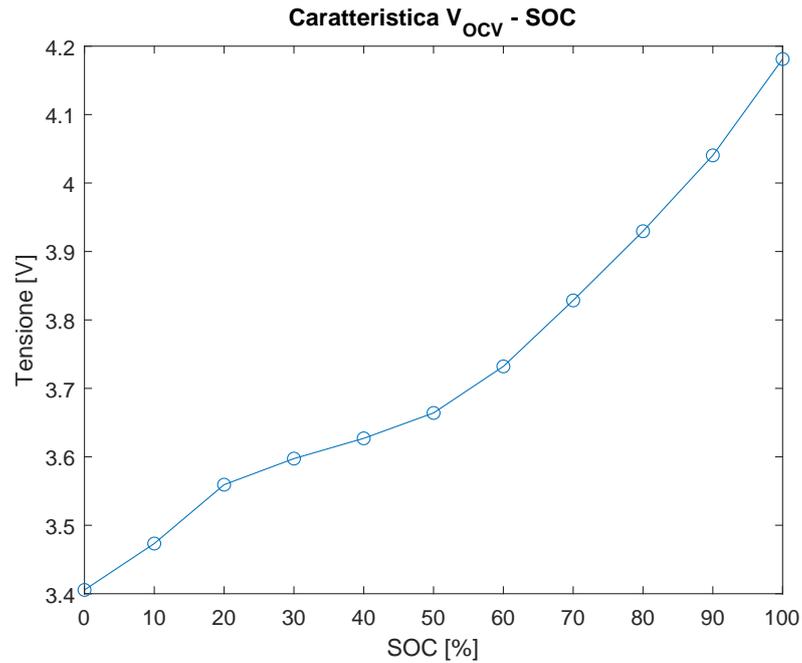


Figura 88: Tensione a circuito aperto in funzione dello stato di carica.

Nelle applicazioni pratiche la caratteristica  $V_{OCV}$ -SOC non viene mai utilizzata per la stima del SOC, dato che è improbabile che durante il normale ciclo di lavoro ci sia un intervallo di tempo in cui la batteria non è sotto carico, rendendo quindi impossibile la misura della tensione a circuito aperto. In queste tipologie di utilizzo la misura del SOC viene effettuata attraverso algoritmi di stima più o meno complessi in base all'applicazione.

Tuttavia, nel caso in esame, non è necessario conoscere il SOC quando la cella è sotto carico, perché avendo determinato i parametri della cella attraverso le prove di caratterizzazione di base, è possibile stabilire a priori la capacità da scaricare.

Conoscere la caratteristica  $V_{OCV}$ -SOC è importante nelle fasi preliminari all'esecuzione della spettroscopia d'impedenza, dal momento che è possibile costruire una mappa dei parametri della cella in funzione dello stato di carica e della temperatura. Misurando la tensione a circuito aperto e sfruttando fig. 88, si determina il SOC e quindi il posizionamento del set di parametri nella mappa bidimensionale.

Un secondo parametro, determinabile dalle prove di base, è la resistenza ohmica complessiva della cella,  $R_{ohm,tot}$ . La conoscenza esatta di  $R_{ohm}$ ,  $R_{SEI}$  e  $R_{ct}$  che compaiono nel modello di fig. 48 è possibile solo utilizzando la spettroscopia.

La stima  $R_{ohm,tot}$  è stata ottenuta usando il carico attivo configurato, in modo da generare un gradino di corrente alla ricezione di un opportuno segnale di trigger, generato a sua volta da un'interfaccia appositamente creata in LabView. Per l'acquisizione dei dati di tensione a riposo e sotto carico, si è sfruttata l'interfaccia FPGA del cRio

per l'elevata frequenza di acquisizione richiesta, 50 kHz.

Il test atto alla conoscenza di  $R_{\text{ohm,tot}}$  è stato svolto nella stessa prova sperimentale utilizzata per il calcolo della caratteristica  $V_{\text{OCV-SOC}}$ . Prima dell'inizio di ogni periodo di scarica sono stati svolti i seguenti passaggi:

1. misura della tensione a circuito aperto;
2. applicazione di un gradino di corrente di 2 A;
3. misura della tensione sotto carico.

Questa sequenza di passaggi è stata eseguita dieci volte, in modo da calcolare  $R_{\text{ohm,tot}}$  in funzione dello stato di carica.

Per il calcolo di  $R_{\text{ohm,tot}}$  si è sfruttata la conoscenza della tensione a circuito aperto e di quella sotto carico misurata nel momento in cui è stato applicato il gradino di corrente. L'espressione utilizzata per il calcolo è:

$$R = \frac{V_{\text{OCV}} - V_{\text{UL}}}{I} \quad (39)$$

con  $V_{\text{UL}}$  è la tensione sotto carico.

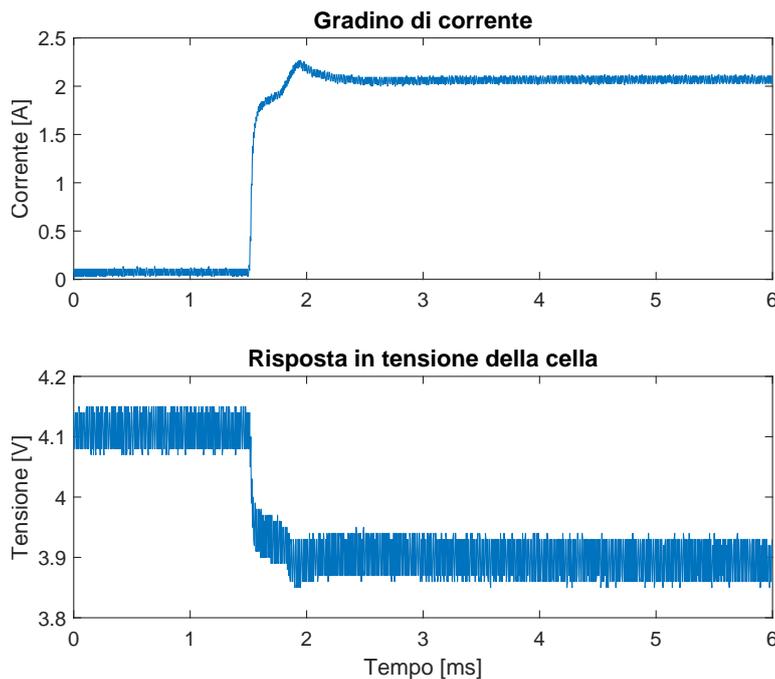


Figura 89: Gradino di corrente generato dal carico attiva e corrispettiva risposta in tensione della cella.

Per la corretta esecuzione del test è necessario prelevare la tensione della cella sotto carico non appena viene applicato il gradino. Questo avviene per ridurre il più possibile il calo di tensione dovuto alla scarica indotta dal gradino di corrente. Tuttavia, non essendo il carico attivo un dispositivo ideale, il gradino di corrente generato non è

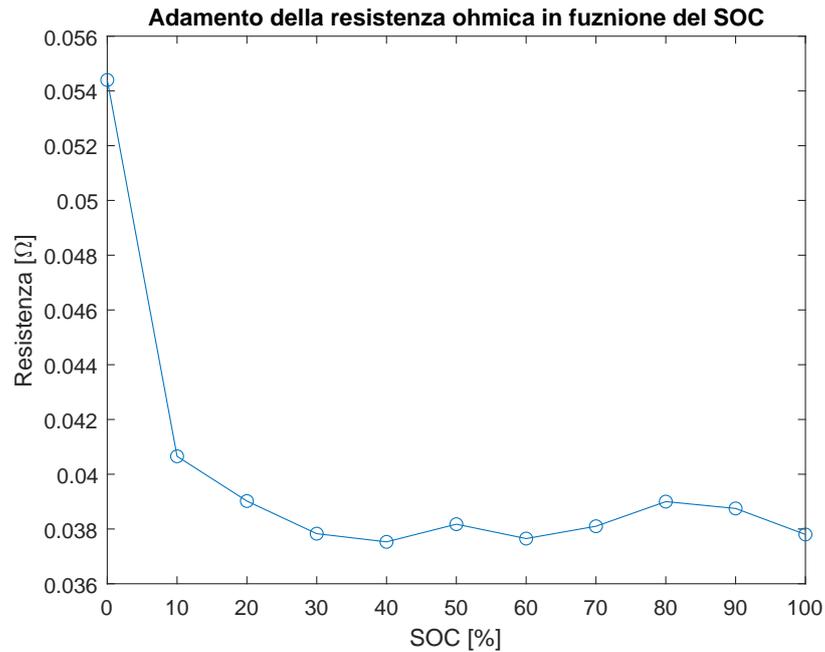


Figura 90: Gradino di corrente generato dal carico attivo e corrispettiva risposta in tensione della cella.

perfettamente un'onda quadra e questo richiede di prelevare la tensione sotto carico non appena la corrente si è stabilizzata. A tal fine, è stato rilevato il gradino di corrente generato dal carico attivo per determinare in quale istante temporale eseguire la misura. Il risultato è riportato in fig. 89

I grafici di fig. 89 sono stati ottenuti sfruttando l'oscilloscopio, che permette una frequenza di acquisizione di 1 GSamples/s. Si osserva come, passati 1.5 ms dall'applicazione del gradino, la corrente si è stabilizzata al valore di regime permettendo quindi la rilevazione della tensione sotto carico.

Il valore di  $R_{ohm,tot}$ , ricavato dall'applicazione di corrente, comprende anche la resistenza dei conduttori e di contatto del case contenente la cella. Di conseguenza, nei risultati sperimentali presentati in fig. 90 è stato eliminato tale valore, determinato attraverso una misura di resistenza a 4 fili sfruttando un multimetro da banco.

Come si può osservare, l'andamento della resistenza in funzione dello stato di carica è di natura non lineare. Presenta un deciso innalzamento in prossimità dello stato di carica 0%. Questo fenomeno si verifica dal momento che in tale situazione la maggior parte dei portatori di carica è ormai migrata dall'anodo al catodo e quindi non ve ne sono più di disponibili, comportando un deciso aumento della resistenza.

## 5.2 TEST DELL'ALGORITMO PER L'ESECUZIONE DELLA SPETTROSCOPIA

In seguito si riportano i test condotti per verificare il corretto funzionamento dell'algoritmo, atto all'esecuzione della spettroscopia e al calcolo dell'impedenza della cella, a delle frequenze stabilite a priori.

In precedenza (fig. 71), era stata mostrata l'interfaccia grafica utilizzata per la programmazione della FPGA. Tuttavia svolgeva il solo compito di generare e acquisire dei segnali. L'interfaccia di comando, la cui esecuzione avviene nel PC e non nel cRio, ha il compito di controllare ed elaborare i segnali acquisiti al fine di determinare l'impedenza della cella.

Il corretto funzionamento dell'algoritmo è stato verificato come metodo per tracciare sperimentalmente la funzione di trasferimento di un filtro passa basso del primo ordine. Anche se la metodologia con la quale viene tracciato il diagramma di Bode è completamente diversa da quella richiesta per l'esecuzione della spettroscopia, l'idea alla base del suo funzionamento è la medesima. Infatti, per tracciare il diagramma del modulo si è eseguito il rapporto tra l'ampiezza del segnale in ingresso e quello in uscita determinato, utilizzando la trasformata di Fourier. Procedimento analogo è stato adottato per il diagramma delle fasi: si è eseguita la differenza tra le fasi della sinusoidale in ingresso e in uscita, determinate anch'esse attraverso un'operazione di FFT.

In fig. 90 è riportata l'interfaccia di controllo e di visualizzazione. È possibile individuare quattro macro sezioni: la prima dedicata alla rappresentazione grafica del segnale acquisito e generato; la seconda e la terza riportano modulo, fase, parte reale e immaginaria, rispettivamente del segnale in ingresso e in uscita; nella quarta sezione è possibile inserire l'ampiezza in *Volt* e visualizzare la frequenza dell'onda sinusoidale generata. Nella medesima sezione sono riportati i risultati sotto forma di modulo e fase e il numero di campioni utilizzato per l'operazione di FFT.

Il filtro passa basso del primo ordine utilizzato nel test è composto da un condensatore di capacità 47 nF e una resistenza di 6.78 k $\Omega$ , con una frequenza di taglio di 500 Hz. Tale frequenza è stata scelta affinché fosse al centro del range di frequenze utilizzate nella spettroscopia.

Il test è stato svolto tra una frequenza di 1 Hz e 1049 Hz con un incremento di un'unità ad ogni ciclo, seguito poi dalle frequenze 1050, 1200, 1400, 1600, 1800 e 2000 Hz. Avendo la necessità di un'elevata risoluzione frequenziale per il primo blocco di frequenze, si è reso necessario utilizzare un numero elevato di campioni per l'operazione di FFT.

Il diagramma di Bode sperimentale è riportato in fig. 92: si osserva come i punti ricavati sperimentalmente siano esattamente sovrapposti

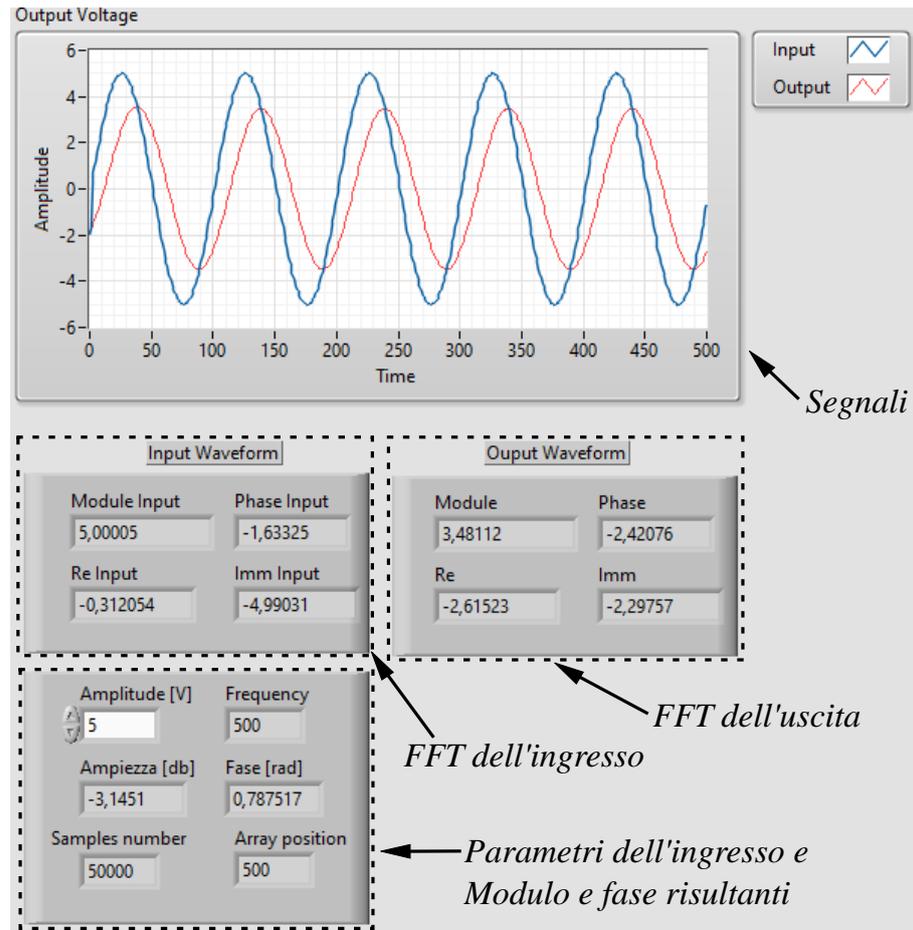


Figura 91: Interfaccia di controllo in LabView utilizzata per la verifica del funzionamento dell'algoritmo per l'esecuzione della spettroscopia.

all'andamento della curva teorica.

Appurato il corretto funzionamento dell'algoritmo è possibile concludere che, nel caso in cui venisse impiegato per eseguire la spettroscopia, il risultato sarebbe quello desiderato, in quanto l'unica differenza sta nel non eseguire il rapporto tra i moduli e la differenza tra le fasi, ma tra i numeri complessi corrispondenti ad ingresso ed uscita.

Nell'esempio precedente si era utilizzato un elevato numero di frequenze per dimostrare il corretto funzionamento dell'algoritmo. Tuttavia l'altissimo numero di campioni (50 mila) ha richiesto un tempo di esecuzione complessivo di quasi 18 min.

La spettroscopia nasce come un'operazione di diagnosi veloce e tempi di esecuzione di decine di minuti non sono accettabili, perché comparabile con il tempo medio di sosta di un veicolo ad una colonnina di ricarica ultra fast. D'altra parte, non è neppure richiesta un'elevata risoluzione temporale ad un range di frequenze così elevate. Infatti, in questo lavoro la spettroscopia viene eseguita allo scopo

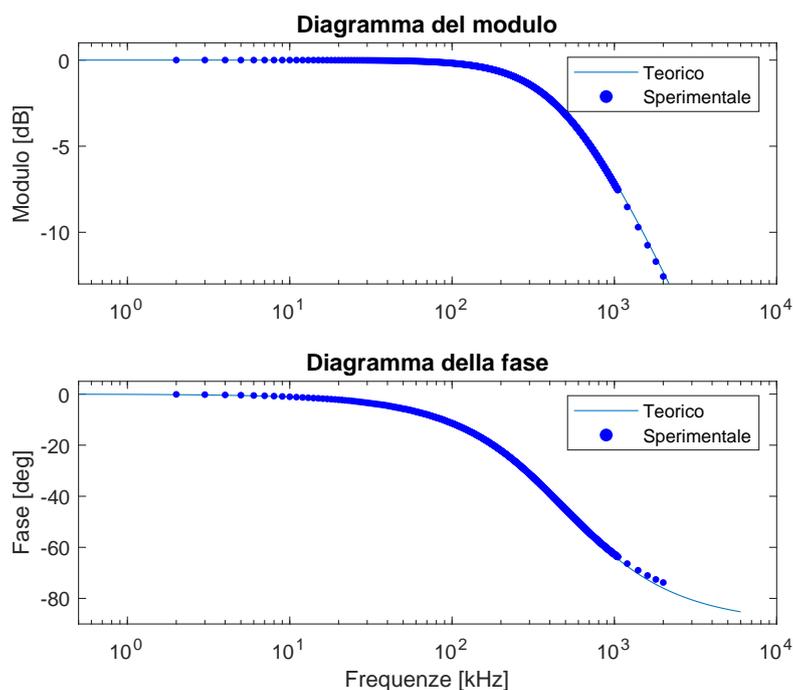


Figura 92: Diagramma di Bode sperimentale del filtro passa basso del primo ordine.

di stimare lo stato di salute, rendendo trascurabili i fenomeni diffusivi che avvengono a bassissima frequenza.

Più adatto è un intervallo che va da 1 Hz a 3 kHz con 10 frequenze per ogni decade. Questo permette di scegliere il numero di campioni in funzione della risoluzione temporale richiesta. Con queste specifiche e supponendo la medesima frequenza di campionamento di 50 kHz, la durata del test è di 11 s.

### 5.3 PROVE D'INVECCHIAMENTO

In fig. 93 è rappresentata l'interfaccia di LabView, sviluppata per eseguire in modo automatico i test d'invecchiamento.

I parametri caratteristici della cella, ricavati attraverso le prove di base precedentemente svolte, sono stati utilizzati per fissare le condizioni di esecuzione del test d'invecchiamento. La sequenza logica indicante il suo funzionamento rispetta quella riportata in fig. 67.

In funzione della prova che deve essere effettuata, i relè presenti nella scheda elettronica precedentemente realizzata devono assumere una particolare configurazione. Questo compito viene svolto dall'interfaccia LabView che è in grado di pilotare i relè in modo automatico, ma anche manualmente utilizzando gli opportuni comandi.

Un'ulteriore funzione implementata è la calibrazione del sistema per eseguire la spettroscopia. Si ricorda come sia stato necessario utilizzare degli amplificatori per strumentazione per amplificare il

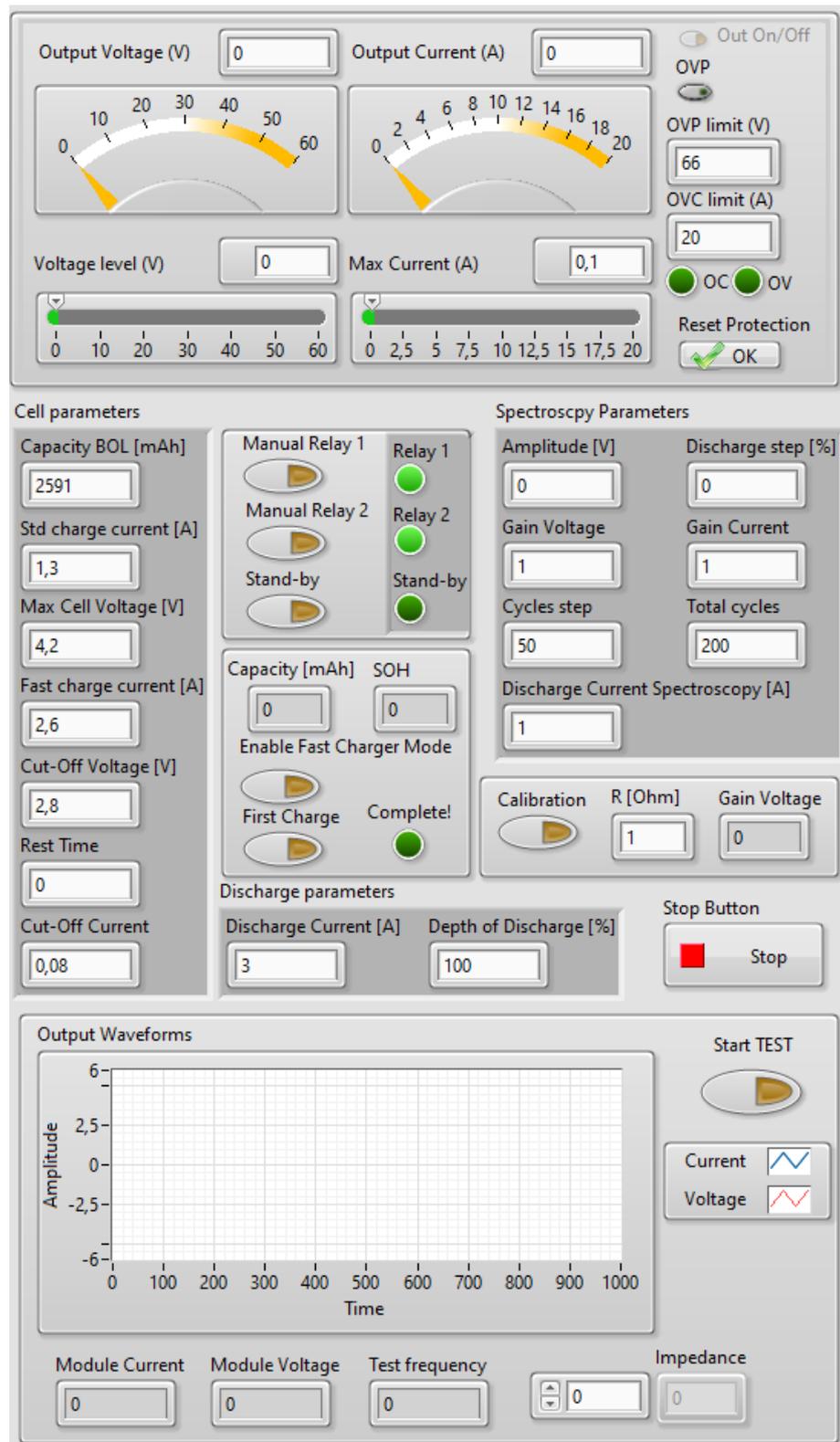


Figura 93: Interfaccia LabView per le prove d'inecchiamento.

segnale di tensione. Il guadagno che ne deriva è stato fissato utilizzando delle resistenze smd: il loro valore non è esatto e ci possono

essere delle variazioni. Per risolvere questo problema si esegue la calibrazione, al fine di determinare il guadagno dell'amplificatore per strumentazione. Tale procedura consiste nell'iniettare una corrente in una resistenza di valore noto, misurarne la risposta in tensione e infine calcolare il guadagno reale.



## CONCLUSIONI

---

Le prove sperimentali hanno confermato la forte non linearità di un accumulatore agli ioni di litio e di conseguenza, della necessità di un'attenta fase di caratterizzazione prima di eseguire un qualsiasi test. In particolare, si è osservato come il comportamento dell'accumulatore sia fortemente correlato alla corrente di carica e scarica e come i parametri dipendano dall'istante in cui vengono misurati.

Un'ulteriore serie di prove che può essere condotta è valutare come le curve caratteristiche dell'accumulatore dipendano dalla temperatura alla quale vengono eseguite. Si troverà che al diminuire della temperatura si verificherà una riduzione della capacità scaricabile e un aumento della resistenza  $R_{ohm}$ , fenomeno dovuto alla limitata mobilità delle cariche alle basse temperature.

Si è inoltre osservato come LabView offra la possibilità di pilotare facilmente tutta la strumentazione necessaria all'esecuzione dei test di invecchiamento, in particolare quella usata per la spettroscopia d'impedenza.

Nella parte di laboratorio si è dovuto costruire tutta la strumentazione necessaria, per verificare come la spettroscopia d'impedenza possa essere utilizzata per la stima dello stato di salute di un accumulatore. Per poterne confermare la validità, è necessario eseguire dei test d'invecchiamento, con lo scopo di determinare il parametro del modello della cella da utilizzare per il calcolo dello SOH.

La durata di un tipico ciclo di invecchiamento è nell'ordine dei mesi. Per questo motivo non si ha avuto il tempo di sperimentarli e pertanto si ritiene che ciò possa essere costituito un proseguimento di questa tesi.

Sarebbe inoltre interessante verificare il funzionamento della spettroscopia non applicata ad un sola cella, ma ad un pacco batteria, con l'obiettivo di implementarla all'interno del convertitore di una stazione di ricarica.



## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] B. S. I. S. Publication, "BS EN 61851-1 Electric vehicle conductive charging system. Part 1," no. February, 2014.
- [2] R. Imprese and G. Tecnica, "Norme tecniche - guide IEC e CEI," vol. 8, 2008.
- [3] M. C. Falvo, D. Sbordone, I. S. Bayram, and M. Devetsikiotis, "EV charging stations and modes: International standards," *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2014*, pp. 1134–1139, 2014.
- [4] O. Turksoy, U. Yilmaz, and A. Teke, "Overview of Battery Charger Topologies in Plug-In Electric and Hybrid Electric Vehicles," *16th International Conference on Clean Energy (ICCE-2018)*, no. September, pp. 9–11, 2018.
- [5] Iec, "BS EN 62196-1 Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles. Part 1," *English*, 2014.
- [6] "BS EN 62196-2 Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles. Part 2," 2017.
- [7] "Veicoli elettrici: la verità su connettori e modalità di ricarica - e-Station." [Online]. Available: <https://www.e-station.it/colonnine-di-ricarica/veicoli-elettrici-la-verita-su-connettori-e-modalita-di-ricarica>
- [8] "Guida alla ricarica, tipologie di connettore," pp. 1–6. [Online]. Available: <https://www.e-station.it/guida-alla-ricarica.html>
- [9] "BS EN 62196-3 Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles. Part 3," 2014.
- [10] B. Bart, "Level 1 and Level 2 Electric Vehicle Service Equipment ( EVSE ) Reference Design," no. February, pp. 1–36, 2016. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/tidub87/tidub87.pdf>
- [11] B. S. I. S. Publication, "BS EN 61851-24 Digital communication between a d.c. EV charging station and an electric vehicle for control of d.c.charging. Part 24," no. June, 2014.
- [12] R. Collin, Y. Miao, A. Yokochi, P. Enjeti, and A. Von Jouanne, "Advanced electric vehicle fast-charging technologies," *Energies*, vol. 12, no. 10, 2019.

- [13] C.-y. Oh, S. Member, D.-h. Kim, and S. Member, "A High-Efficient Nonisolated Single-Stage On-Board," vol. 28, no. 12, pp. 5746–5757, 2013.
- [14] D. S. Gautam, F. Musavi, M. Edington, W. Eberle, and W. G. Dunford, "An automotive onboard 3.3-kW battery charger for PHEV application," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 8, pp. 3466–3474, 2012.
- [15] H. Li, L. Bai, Z. Zhang, S. Wang, J. Tang, X. Ren, and J. Li, "A 6.6kW SiC bidirectional on-board charger," *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, vol. 2018-March, no. 51722702, pp. 1171–1178, 2018.
- [16] P. M. Johnson and K. H. Bai, "A dual-DSP controlled SiC MOSFET based 96%-efficiency 20kW EV on-board battery charger using LLC resonance technology," *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2017 - Proceedings*, vol. 2018-Janua, pp. 1–5, 2018.
- [17] "Specification Sheet (Rev. 3.0) 3.5 kW On Board Charger," Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: [www.gpe-energy.com](http://www.gpe-energy.com)
- [18] "Specification Sheet (Rev. 3.0) 6.6 kW On Board Charger," Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: [www.gpe-energy.com](http://www.gpe-energy.com)
- [19] "On-Board Charger Efficient power electronics for AC and DC charging," Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: [www.innoelectric.ag](http://www.innoelectric.ag)
- [20] M. Kazerani, "A REVIEW OF BIDIRECTIONAL ON-BOARD CHARGER TOPOLOGIES FOR PLUGIN VEHICLES Noreen Wong and Mehrdad Kazerani , Senior Member , IEEE Department of Electrical and Computer Engineering University of Waterloo Waterloo , Ontario , Canada," pp. 0–5, 2012.
- [21] D. Ronanki, A. Kelkar, and S. S. Williamson, "Extreme fast charging technology-prospects to enhance sustainable electric transportation," *Energies*, vol. 12, no. 19, pp. 1–17, 2019.
- [22] S. Haghbin, "Design of a 300 kW Compact and Efficient Fast Charger Station Utilizing High-Power SiC Modules and Nanocrystalline Magnetic Materials," *2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2018 ECCE Europe*, pp. 1–7, 2018.
- [23] M. Vasiladiotis, B. Bahrani, N. Burger, and A. Rufer, "Modular converter architecture for medium voltage ultra fast EV charging stations: Dual half-bridge-based isolation stage," *2014 International Power Electronics Conference, IPEC-Hiroshima - ECCE Asia 2014*, pp. 1386–1393, 2014.

- [24] "High Power Charging System by Tritium," Tech. Rep., 2018.
- [25] M. Dc-power, "Ready for all cars, trucks, and busses."
- [26] "Ultra Fast Charger - Charge with up to 150 kW - Emobility Solutions from Delta." [Online]. Available: <https://emobility.delta-emea.com/en/Ultra-Fast-Charger.htm>
- [27] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof, and P. J. Ker, "State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19 362–19 378, 2018.
- [28] "DoITPoMS - TLP Library Batteries - Battery characteristics." [Online]. Available: [https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/battery{}\\_characteristics.php{#}](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/battery{}_characteristics.php{#})
- [29] "DoITPoMS - TLP Library Batteries - Battery characteristics." [Online]. Available: [https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/battery{}\\_characteristics.php{#}](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/battery{}_characteristics.php{#})
- [30] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu, "The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, no. June, pp. 292–308, 2018.
- [31] X. Y. Yao and M. G. Pecht, "Tab design and failures in cylindrical li-ion batteries," *IEEE Access*, vol. 7, no. February, pp. 24 082–24 095, 2019.
- [32] Panasonic, "BU-301a: Types of Battery Cells," *Battery University*, no. Cid, pp. 1–17, 2019. [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/types{}\\_of{}\\_battery{}\\_cells](https://batteryuniversity.com/learn/article/types{}_of{}_battery{}_cells)
- [33] "What are Parallel and Series Connections? - VRUZEND DIY Battery Kit." [Online]. Available: <https://vruzend.com/tech-center/what-are-parallel-and-series-connections/>
- [34] E. Vehicle and E. Range, "Electric Vehicle Enhanced Range , Lifetime And Safety Through INGenious battery management D6 . 2 - Requirements and architecture concept of a highly modular prototyping hardware platform February 2017," no. 713771, pp. 1–140, 2017.
- [35] M. Lelie, T. Braun, M. Knips, H. Nordmann, F. Ringbeck, H. Zapfen, and D. U. Sauer, "Battery management system hardware concepts: An overview," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 4, 2018.

- [36] M. Daowd, N. Omar, P. van den Bossche, and J. van Mierlo, "A review of passive and active battery balancing based on MATLAB/Simulink," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 6, no. 7, pp. 2974–2989, 2011.
- [37] J. Qi and D. Dah-Chuan Lu, "Review of battery cell balancing techniques," *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2014 - Proceedings*, no. October, pp. 1–6, 2014.
- [38] M. Bercibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van Den Bossche, "Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 572–587, 2016.
- [39] A. Maheshwari, M. Heck, and M. Santarelli, "Cycle aging studies of lithium nickel manganese cobalt oxide-based batteries using electrochemical impedance spectroscopy," *Electrochimica Acta*, vol. 273, pp. 335–348, 2018.
- [40] S. Bin Gou, Yan Xu and X. Feng, "An Ensemble Learning-based Data-Driven Method for Online State-of-Health Estimation of Lithium-ion Batteries," 2020.
- [41] J. Kim, H. Chun, M. Kim, J. Yu, K. Kim, T. Kim, and S. Han, "Data-Driven State of Health Estimation of Li-Ion Batteries with RPT-Reduced Experimental Data," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 106 987–106 997, 2019.
- [42] J. Meng, L. Cai, D. I. Stroe, G. Luo, X. Sui, and R. Teodorescu, "Lithium-ion battery state-of-health estimation in electric vehicle using optimized partial charging voltage profiles," *Energy*, vol. 185, pp. 1054–1062, 2019.
- [43] A. Area, "Application Area : Fundamental Electrochemical Impedance Spectroscopy ( EIS ) Part 1 - Basic Principles," *Metrohm autolab*, pp. 1–3, 2007.
- [44] L. PIEGARI Correlatore and I. Riccardo LAZZARI Giovanni Viganò Matr, "Modellazione Elettrica E Termica Di Una Batteria Agli Ioni Di Litio Con Stimatore Dello Stato Di Carica," 2013.
- [45] R. Koch, R. Kuhn, I. Zilberman, and A. Jossen, "Electrochemical impedance spectroscopy for online battery monitoring - power electronics control," pp. 1–10, Aug 2014.
- [46] U. Westerhoff, K. Kurbach, F. Lienesch, and M. Kurrat, "Analysis of Lithium-Ion Battery Models Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy," *Energy Technology*, vol. 4, no. 12, pp. 1620–1630, 2016.

- [47] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, C. Wimmer, T. Soczka-Guth, and D. U. Sauer, "Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 12, pp. 5334–5341, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.12.102>
- [48] C. Pastor-Fernández, K. Uddin, G. H. Chouchelamane, W. D. Widanage, and J. Marco, "A Comparison between Electrochemical Impedance Spectroscopy and Incremental Capacity-Differential Voltage as Li-ion Diagnostic Techniques to Identify and Quantify the Effects of Degradation Modes within Battery Management Systems," *Journal of Power Sources*, vol. 360, pp. 301–318, 2017.
- [49] D. I. Stroe, M. Swierczynski, A. I. Stan, V. Knap, R. Teodorescu, and S. J. Andreasen, "Diagnosis of lithium-ion batteries state-of-health based on electrochemical impedance spectroscopy technique," *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2014*, pp. 4576–4582, 2014.
- [50] W. Waag, S. Käbitz, and D. U. Sauer, "Experimental investigation of the lithium-ion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application," *Applied Energy*, vol. 102, pp. 885–897, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.030>
- [51] X. Wang, X. Wei, and H. Dai, "Estimation of state of health of lithium-ion batteries based on charge transfer resistance considering different temperature and state of charge," *Journal of Energy Storage*, vol. 21, no. August 2018, pp. 618–631, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.11.020>
- [52] E. Sadeghi, M. H. Zand, M. Hamzeh, M. Saif, and S. M. M. Alavi, "Controllable Electrochemical Impedance Spectroscopy: From Circuit Design to Control and Data Analysis," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 9, pp. 9935–9944, 2020.
- [53] S. M. R. Islam, S. Park, and B. Balasingam, "Circuit parameters extraction algorithm for a lithium-ion battery charging system incorporated with electrochemical impedance spectroscopy," in *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2018, pp. 3353–3358.
- [54] B. Csomos and D. Fodor, "Identification of the material properties of an 18650 li-ion battery for improving the electrochemical model used in cell testing," *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, vol. 48, 07 2020.

- [55] L. Battery, S. Sdi, R. Marking, S. S. D. I. Co, and E. Division, "Specification of product ICR18650-26J M Samsung," no. 1, pp. 0-19.