

**POLITECNICO DI MILANO**

**Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica**

**Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria**



**LE BATTERIE E LE INFRASTRUTTURE DI RICARICA  
DEI VEICOLI ELETTRICI**

Relatore: Prof. Enrico Tironi

Correlatore: Ing. Michele Scalvini

Tesi di Laurea Magistrale di:

Fabio Bandiera

Matr. 781942

Anno Accademico 2012-2013



*Ringrazio il mio relatore Prof. Enrico Tironi, per tutti i consigli che mi ha dato e tutta la  
pazienza che ha avuto nel seguirmi.*

*Ringrazio Ing. Michele Scalvini e Ing. Re Marcello, per avermi dato la possibilità di poter  
fare questa tesi presso Bticino e di avermi sempre aiutato durante questo lavoro.*

*Ringrazio anche Giorgio, Mirko, Enrico, Donato, Roberto, che mi sono stati sempre di  
supporto e mi hanno sempre saputo aiutare.*

*Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, a Debora, ed a tutti i miei amici che mi  
sono sempre stati vicini fin dal primo giorno che ho iniziato l'Università.*



---

# INDICE

<b>INDICE</b> .....	<b>i</b>
<b>INDICE FIGURE</b> .....	<b>v</b>
<b>SOMMARIO</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>5</b>
<b>1.Accumulatori al Litio</b> .....	<b>11</b>
1.1 Introduzione .....	11
1.2 Generalità batterie Litio.....	15
1.2.1 Batterie Litio-Ione.....	15
1.2.2 Batterie Litio-Metallico.....	23
1.3 Andamento della tensione durante la scarica .....	25
1.4 Caratteristiche tensione e corrente durante la carica .....	29
1.5 Invecchiamento .....	33
1.6 Dimensionamento Accumulatore.....	37
1.6.1 Parametri caratteristici cella .....	37
1.6.2 Assemblaggio batteria.....	41
1.7 Gestione accumulatore.....	46
1.7.1 Introduzione alla gestione della batteria .....	46
1.7.2 Effetti prodotti dalla tensione, dalla corrente e dalla temperatura .....	46
1.7.3 Bilanciamento batteria.....	47
<b>2.Modello batteria al Litio</b> .....	<b>55</b>
2.1 Introduzione .....	55
2.2 Descrizione matematica dei fenomeni elettrochimici .....	57
2.3 Creazione modello elettrico circuitale.....	67
2.4 Altre tipologie di modelli elettrici circuitali .....	76
<b>3.Banco prova per test su batterie al Litio</b> .....	<b>79</b>

---

3.1 Introduzione .....	79
3.2 Strumenti utilizzati.....	80
3.3 Realizzazione carico elettronico.....	83
3.4 Realizzazione circuito di protezione.....	93
3.4.1 Circuito di protezione di massima tensione.....	94
3.4.2 Circuito di protezione di minima tensione.....	98
<b>4.Valutazione e simulazione del modello circuitale di una batteria al Litio .....</b>	<b>103</b>
4.1 Introduzione .....	103
4.2 Scelta del tipo di batteria da sottoporre alle prove sperimentali.....	103
4.3 Prove sperimentali per la valutazione dei parametri circuitali.....	105
4.3.1 Valutazione tensione di circuito aperto.....	106
4.3.2 Valutazione dei parametri serie e parallelo.....	117
4.4 Simulazione numerica di una batteria al Litio .....	123
<b>5. Prove sperimentali per la valutazione della presenza di correlazione tra la tensione e la corrente di scarica.....</b>	<b>129</b>
5.1 Introduzione .....	129
5.2 Test sperimentali.....	130
5.2.1 Test con corrente pari a 3.1A, prova di riferimento.....	131
5.2.2 Successivi test con differenti correnti di scarica.....	133
5.2.3 Confronto dei risultati sperimentali.....	144
<b>6. La gestione delle cariche con il Green Up Manager di Bticino .....</b>	<b>161</b>
6.1 Introduzione .....	161
6.2 Tipologie e modalità di ricarica dei veicoli elettrici.....	162
6.3 Soluzioni adottate dal gruppo Bticino.....	169
6.4 Logica di gestione delle cariche.....	173
6.4.1 Scelta di un modello circuitale adattabile a più batterie al Litio.....	175
6.4.2 Simulazione circuitale del modello semplificato.....	181

---

6.4.3 Esempio applicativo di una gestione delle cariche .....	186
<b>7. Conclusioni e sviluppi futuri.....</b>	<b>197</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>199</b>





## INDICE FIGURE

Fig. I.1 – Primo veicolo elettrico, Voiture Légère de Ville .....	6
Fig. I.2 – Linea blu, aumento CO <sub>2</sub> in parti per milione; linea rossa, aumento temperatura negli ultimi 1000 anni .....	6
Fig. 1.1 – Processo di scarica      Fig. 1.2 – Processo di carica .....	12
Fig. 1.3 – Batteria non riciclabile      Fig. 1.4 – Batteria riciclabile.....	13
Fig. 1.5 – Diagramma di Ragone.....	14
Fig. 1.6-a – Struttura a bottone di una batteria Litio-Ione.....	16
Fig. 1.6-b – Struttura cilindrica di una batteria Litio-Ione .....	16
Fig. 1.6-c – Struttura prismatica di una batteria Litio-Ione.....	16
Fig. 1.7 – Caratteristiche di diverse batterie in funzione della composizione degli elettrodi.....	21
Fig. 1.8 – Processo di carica e scarica di una batteria Litio-Ione.....	23
Fig. 1.9 – Struttura di una batteria litio-Metallico .....	24
Fig. 1.10 – Andamento della tensione di un generico accumulatore .....	26
Fig. 1.11 – Andamento della tensione di una batteria Litio-Ione.....	27
Fig. 1.12 – Andamento della temperatura durante la scarica.....	28
Fig. 1.13 – Andamento della tensione in funzione della temperatura e dello stato di scarica.....	28
Fig. 1.14 – Caratteristica di carica .....	31
Fig. 1.15 – Agenti che provocano l'invecchiamento della batteria.....	33
Fig. 1.16 – Andamento della capacità in funzione del numero di cicli di lavoro per una generica batteria.....	34
Fig. 1.17 – Andamento capacità in funzione del numero di cicli di lavoro per una batteria LiFePO <sub>4</sub> .....	35
Fig. 1.18-a – Andamento capacità della batteria in funzione del numero di cicli di lavoro per diverse tipologie di carica e scarica.....	36
Fig. 1.18-b – Andamento della resistenza interna in funzione del numero di cicli di lavoro.....	37
Fig. 1.19 – Rappresentazione di una batteria come un bipolo generatore .....	37
Fig. 1.20-a – Bipolo che assorbe energia      Fig. 1.20-b – Bipolo che cede energia.....	38
Fig. 1.21 – Batteria vista come l'insieme di celle connesse in serie ed in parallelo.....	42
Fig. 1.22 – Valori da raggiungere nel breve e nel lungo periodo .....	44
Fig. 1.23 – Costi attuali di batterie al Litio Cobalto ed al Litio Ferro Fosfato .....	45
Fig. 1.24 – Equalizzazione passiva .....	50
Fig. 1.25 – Equalizzazione attiva a spostamento di carica .....	51
Fig. 1.26 – Equalizzazione attiva switched transformer .....	52
Fig. 1.27 – Equalizzazione attiva con trasformatore a secondari multipli .....	53
Fig. 1.28 – Equalizzazione attiva con trasformatori multipli.....	53
Fig. 2.1 – Accuratezza e sforzo computazionale in funzione del tipo di modello di batteria .....	56
Fig. 2.2 – Struttura fisica batteria e sistema di riferimento macroscopico.....	58
Fig. 2.3 – Sistema di riferimento microscopico della particella dell'anodo e del catodo .....	59
Fig. 2.4 – Batteria come sistema termodinamico .....	67

Fig. 2.5-a – Tensione in funzione dello stato di carica approssimata con una funzione polinomiale di sesto grado .....	69
Fig. 2.5-b – Tensione in funzione della profondità di scarica approssimata con una funzione polinomiale di sesto grado .....	69
Fig. 2.5-c – Curve di carica e scarica in funzione del SOC, con la valutazione dell'isteresi .....	71
Fig. 2.6 – Circuito equivalente di Thevenin .....	72
Fig. 2.7 – Circuito equivalente DP Dual Polarization .....	73
Fig. 2.8 – Modello di una batteria al Litio, con l'aggiunta della modellizzazione dell'autoscarica e dell'invecchiamento dell'accumulatore .....	75
Fig. 2.9 – Variazione al modello DP .....	76
Fig. 2.10 – Modello PNGV.....	77
Fig. 2.11 – Modello PNGV semplificato .....	77
Fig. 2.12 – Modello RC.....	78
Fig. 3.1 – Data Logger Agilent 34970A .....	80
Fig. 3.2 – Pinza amperometrica .....	81
Fig. 3.3 – Generatore Principale .....	82
Fig. 3.4 – Generatore Secondario.....	82
Fig. 3.5 – Switcher temporizzato .....	83
Fig. 3.6 – Carico elettronico.....	85
Fig. 3.7 – Andamento tensione e corrente ai capi del generatore fittizio .....	86
Fig. 3.8 – Andamento corrente al variare della resistenza $R_5$ .....	87
Fig. 3.9 – Carico elettronico fronte e retro.....	88
Fig. 3.10 – Valutazione reale della corrente al variare della tensione .....	89
Fig. 3.11 – Assemblaggio Dissipatore Mosfet.....	90
Fig. 3.12 – Circuito termico tra la giunzione e l'ambiente .....	91
Fig. 3.13 – Prove di temperatura.....	92
Fig. 3.14 – Circuito elettronico fronte e retro .....	94
Fig. 3.15 – Circuito di protezione di massima tensione.....	95
Fig. 3.16 – La curva rossa rappresenta la tensione della soglia sulla resistenza $R_9$ ; la curva verde rappresenta la tensione simulata dal generatore $V_2$ .....	97
Fig. 3.17 – La curva blu rappresenta la tensione in uscita dall'amplificatore; la curva viola rappresenta la tensione sul collettore del BJT .....	98
Fig. 3.18 – Circuito di protezione di minima tensione.....	99
Fig. 3.19 – La curva verde rappresenta la tensione simulata dal generatore $V_2$ ; mentre la curva rossa rappresenta la tensione della soglia sulla resistenza $R_9$ .....	100
Fig. 3.20 – La curva viola rappresenta la tensione sul collettore del BJT; la curva blu rappresenta la tensione in uscita dall'amplificatore .....	101
Fig. 4.1 – Batteria Li-Ion.....	104
Fig. 4.2 – Caratteristiche della batteria presenti sul Datasheet.....	104
Fig. 4.3 – Modello DP – Dual Polarization .....	105
Fig. 4.4 – Scarica standard con una corrente di 3,1A; tensione ai capi della batteria in Volt, in funzione del tempo espresso in secondi.....	107
Fig. 4.5 – Carica standard con una corrente di 3,1A; tensione ai capi della batteria in Volt, in funzione del tempo espresso in secondi.....	107

Fig. 4.6 – Andamento impulsivo della tensione della batteria [V], durante la scarica, in funzione del tempo [s], con una corrente standard di 3,1A .....	108
Fig. 4.7 – Andamento impulsivo della corrente [A], durante la scarica, in funzione del tempo [s].....	109
Fig. 4.8 – Andamento impulsivo della tensione della batteria [V], durante la scarica, in funzione del tempo [s], con una corrente di 1A .....	110
Fig. 4.9 – Andamento della tensione di circuito aperto OCV [V], in funzione dello stato di carica.....	111
Fig. 4.10 – Andamento impulsivo della tensione della batteria [v], durante la carica, in funzione del tempo [s], con una corrente standard 3,1A.....	112
Fig. 4.11 – Andamento impulsivo della corrente [A], rispetto al tempo [s].....	112
Fig. 4.12 – Andamento impulsivo della tensione della batteria [V], durante la carica, in funzione del tempo [s], con una corrente di 1A .....	114
Fig. 4.13 – Andamento della tensione di circuito aperto OCV [V], in funzione dello stato di carica .....	114
Fig. 4.14 – Confronto isteresi interna della batteria .....	115
Fig. 4.15 – Andamento della tensione di circuito aperto in funzione della profondità di scarica, dallo 0% al 100% .....	116
Fig. 4.16 – Confronto tra la tensione di circuito aperto, risultante dalla funzione polinomiale, e la tensione di circuito aperto reale .....	117
Fig. 4.17 – Prova di apertura per la valutazione dei parametri circuitali di un modello DP, con una corrente di scarica pari a 3,1A.....	118
Fig. 4.18 – Andamento della zona denominata “Area 1” e della funzione che approssima l’andamento reale .....	120
Fig. 4.19 – Confronto della risposta transitoria della tensione utilizzando un modello DP, oppure un modello equivalente di Thevenin. Il transitorio in oggetto è dovuto all’apertura del circuito durante la scarica con una corrente standard pari a 3,1A.....	122
Fig. 4.20 – Zoom sul confronto della risposta transitoria della tensione utilizzando in modello DP, oppure un modello equivalente di Thevenin .....	122
Fig. 4.21 – Modello Simulink, realizzazione anello di corrente con controllo in tensione e stato di carica .....	124
Fig. 4.22 – Modello Simulink, realizzazione circuito a due parametri .....	125
Fig. 4.23 – Simulazione circuito DP; la curva rossa rappresenta la OCV, mentre quella blu rappresenta la tensione di scarica con corrente pari a 3,1A, in funzione del tempo di scarica ....	126
Fig. 4.24 – Simulazione circuito DP; la curva rossa rappresenta la OCV, mentre quella azzurra rappresenta la tensione di scarica con corrente pari a 2,5A, in funzione del tempo di scarica ....	127
Fig. 4.25 – Simulazione circuito DP; la curva rossa rappresenta la OCV, mentre quella verde rappresenta la tensione di scarica con corrente pari a 3,5A, in funzione del tempo di scarica ....	127
Fig. 4.26 – Simulazione circuito DP; la curva rossa rappresenta la OCV, mentre quella viola rappresenta la tensione di scarica con corrente pari a 4A, in funzione del tempo di scarica .....	128
Fig. 4.27 – Simulazione circuito DP; la curva rossa rappresenta la OCV, mentre quella nera rappresenta la tensione di scarica con corrente pari a 4,5A, in funzione del tempo di scarica ....	128
Fig. 5.1 – Prova di scarica per la valutazione della correlazione tra scariche a correnti differenti. Prova standard con 3,1A, che sarà utilizzata come prova di riferimento .....	132
Fig. 5.2 – Valori di OCV con 3,1A.....	133
Fig. 5.3 – Prova di correlazione con 2,5A .....	135

Fig. 5.4 – Valori di OCV con 2,5A .....	136
Fig. 5.5 – Prova di correlazione con 2A .....	137
Fig. 5.6 – Valori di OCV con 2A .....	138
Fig. 5.7 – Prova di correlazione con 2,8A .....	139
Fig. 5.8 – Valori di OCV con 2,8A .....	140
Fig. 5.9 – Valutazione correlazione con 2,2A .....	141
Fig. 5.10 – Valori di OCV con 2,2A .....	142
Fig. 5.11 – Valutazione correlazione con 3,6A .....	143
Fig. 5.12 – Valori di OCV con 3,6A .....	144
Fig. 5.13 – Confronto tra i vari valori di tensione ottenuti scaricando la batteria con diversi valori di corrente .....	145
Fig. 5.14 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 30,798%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo e dell'errore max negativo .....	146
Fig. 5.15 – Andamento della simulazione Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 30,798% .....	147
Fig. 5.16 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 38,396%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo e dell'errore max negativo .....	148
Fig. 5.17 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 38,396% .....	149
Fig. 5.18 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 45,994%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo e dell'errore max negativo .....	150
Fig. 5.19 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 45,994% .....	150
Fig. 5.20 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 53,592%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo e dell'errore max negativo .....	151
Fig. 5.21 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 53,592% .....	152
Fig. 5.22 - Valori di tensione nel punto con DOD pari a 61.19%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo, e dell'errore max negativo .....	153
Fig. 5.23 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 61,19% .....	153
Fig. 5.24 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 68,788%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo, e dell'errore max negativo .....	154
Fig. 5.25 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 61,788% .....	155
Fig. 5.26 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 76,386%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore massimo positivo e dell'errore max negativo .....	156
Fig. 5.27 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 76,386% .....	156
Fig. 5.28 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 83,984%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo e dell'errore max negativo .....	157
Fig. 5.29 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 83,984% .....	158

Fig. 5.30 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 91.582%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo e dell'errore max negativo .....	159
Fig. 5.31 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 91,582%.....	159
Fig. 6.1 – Connettore Yazaki.....	164
Fig. 6.2 – Connettore Mennekes.....	165
Fig. 6.3 – Connettore EV Plug Alliance .....	166
Fig. 6.4 – A sinistra presa Mennekes completa di ricarica DC HIGH, e ricarica trifase; a destra spina per la sola ricarica Mennekes DC HIGH.....	167
Fig. 6.5 – Connettore Chademo per la ricarica rapida DC.....	167
Fig. 6.6 – Schema di funzionamento tipico di una stazione di ricarica di un veicolo elettrico in corrente alternata monofase .....	168
Fig. 6.7 – Schema di principio tipico di una stazione di ricarica per un veicolo elettrico in corrente continua .....	169
Fig. 6.8 – Presa Modo 1 adottata da Bticino .....	170
Fig. 6.9 – Modo 2 di ricarica con Control Box .....	172
Fig. 6.10 – Modo di ricarica 3, presa EV Plug, più presa Schuko, per uso privato residenziale .....	172
Fig. 6.11 – Accesso per la ricarica secondo il modo 1 e 2, con accesso limitato, quindi adatto ad essere installato negli spazi comuni residenziali, o similari .....	172
Fig. 6.12 – Colonnina per uso pubblico, con due accessi per ogni lato.....	173
Fig. 6.13 – Schema di principio per un impianto con alcuni punti di ricarica per i veicoli.....	174
Fig. 6.14 – Circuito semplificato, qui rappresentato in configurazione carica.....	176
Fig. 6.15 – Andamento tensione interna della batteria in funzione dello stato di carica .....	177
Fig. 6.16 – Andamento della tensione, della corrente e dello stato di carica, durante la carica di una batteria al Litio .....	178
Fig. 6.17 – Modello circuitale che modella il primo tratto a corrente impressa.....	178
Fig. 6.18 – Modello circuitale che modella il secondo tratto a tensione impressa .....	180
Fig. 6.19 – Andamento corrente in funzione del tempo ai morsetti della batteria per una carica completa a 22 kW .....	184
Fig. 6.20 – Andamento tensione ai morsetti della batteria in funzione del tempo per una ricarica completa a 22 kW .....	184
Fig. 6.21 – Andamento stato di carica della batteria in funzione del tempo, per una ricarica completa a 22 kW .....	185
Fig. 6.22 – Andamento tensione interna della batteria in funzione del tempo, per una ricarica completa di 22 kW .....	185
Fig. 6.23 – Schematico dei punti di ricarica dell'esempio considerato .....	187
Fig. 6.24 – Connessione dei veicoli alle colonnina C1, C2, C3 .....	189
Fig. 6.25 – Connessione del quarto veicolo che porterebbe a superare la potenza contrattuale. ....	190
Fig. 6.26 – Variazione della potenza del 25%, del veicolo connesso alla stazione C2, in quanto già raggiunta la minima carica garantita da quel veicolo .....	190
Fig. 6.27 – Riduzione al 75% del valore di potenza fornita al veicolo connesso a C4 .....	191
Fig. 6.28 – Riduzione al 50% del valore di potenza al veicolo connesso a C4.....	192
Fig. 6.29 – Riduzione al 75% del valore di potenza al veicolo C1, perché il primo ad essersi connesso.....	192

Fig. 6.30 – Connessione del carico C5, ad una presa non Smart, e variazione della potenza assorbita da C3, in quanto è l'unico veicolo ad aver raggiunto la quantità minima garantita ..... 193

Fig. 6.31 – Ulteriore riduzione della corrente assorbita da C3, così da rispettare il vincolo imposto dalla corrente nominale dell'interruttore a monte..... 194

Fig. 6.32 – Riadattamento dei flussi di potenza per utilizzare al meglio la potenza disponibile, sempre nel caso in cui il carico C3 abbia raggiunto la quantità minima di carica garantita ..... 195

## SOMMARIO

In questo lavoro di tesi si vuole focalizzare l'attenzione sullo studio delle infrastrutture di ricarica dei veicoli elettrici e sulle batterie al Litio. Più precisamente si trattano gli accumulatori al Litio col fine di creare una loro modellizzazione elettrica circuitale. Per arrivare ad un circuito equivalente si deve introdurre il comportamento elettrochimico della batteria che permette di stabilire il compromesso che c'è tra il modello che si vuole creare e lo sforzo computazionale. Il modello creato è utilizzato per due principali scopi: il primo ha come fine lo studio di una possibile correlazione tra la tensione ai morsetti della batteria e la corrente di scarica; ciò permette di capire se si è in grado di stabilire lo stato di carica di una batteria leggendo la sola tensione ai morsetti della batteria stessa. Il secondo scopo invece prevede l'utilizzo del circuito equivalente per la gestione di più veicoli elettrici. La gestione dei veicoli elettrici richiede un modello adattabile facilmente a più batterie al Litio, pertanto si sono fatte delle semplificazioni partendo dal modello generale. Si è affrontato l'argomento dello studio dello stato iniziale di carica e della gestione dei veicoli elettrici, perché essi sono legati fortemente tra loro; in quanto un veicolo elettrico che vuole procedere con la ricarica della propria batteria deve conoscere lo stato iniziale di carica. Infine per capire al meglio come procedere per la gestione delle cariche di più veicoli si è voluto presentare il Green Up Manager di Bticino, tramite un esempio applicativo.





## **ABSTRACT**

This thesis focuses on the recharge's infrastructure of electric vehicle and on lithium batteries. More precisely it talks about the lithium battery for creating circuital electric modeling. To realize this model, this thesis introduces the chemical behavior of a battery, so we can understand the compromise between the model and the computational effort. The model created is used for two goals: the first goal studies a possible correlation between the voltage on the battery's terminals and the discharge current; this help to understand if the value of voltage can estimate the initial state of charge. The second goal studies the managing of many charges of electric vehicles with an equivalent circuit adaptable to most lithium batteries. To obtain this, the starting point is the general equivalent circuit with some simplifications. The studies of the state of charge and of the charge managing are connected together because an electric vehicle that wants to begin a charge must know the battery's initial state of charge. Concluding, this thesis speaks about the Green Up Manager by Bticino, a system that can manage many electric vehicles while charging, focusing on a typical application.



## INTRODUZIONE

Quando si parla di automobili si è abituati a pensare ai classici veicoli con motore a propulsione termica Diesel o Benzina, mentre in questi ultimi anni si sta introducendo un nuovo concetto di automobile legato al Veicolo Elettrico (EV – Electric Vehicle) Utilizzando il termine Veicolo Elettrico, si potrebbe pensare ad una nuova tecnologia nata e pensata negli ultimi anni, ma non è così. L'auto elettrica infatti non si può ritenere un fenomeno moderno, in quanto già nel XIX secolo il motore elettrico era il principale concorrente del motore a combustione interna per il trasporto veicolare. Infatti alla fine del 1800 vi erano presenti veicoli completamente elettrici provvisti di accumulatori al Piombo, con lastre immerse in una soluzione di acqua distillata e acido solforico. Questi primitivi veicoli elettrici hanno combattuto una vera e propria guerra per lo standard, nei primi anni del 1900, contro le auto a vapore e le auto a combustione interna. A causa della modesta autonomia, della velocità limitata e dell'impossibilità di ricaricare il veicolo durante il percorso, i veicoli elettrici non riuscirono però a penetrare il mercato. Non si parlò più di veicoli elettrici fino alla seconda guerra mondiale, quando l'approvvigionamento di carburante era difficoltoso ed utilizzare un veicolo completamente elettrico poteva essere visto come una soluzione al problema. Nel 1941 la casa automobilistica Peugeot, presentò un modello di automobile completamente elettrico (VLV Voiture Légère de Ville - vettura leggera da città), la quale aveva un motore da 1,5 Cv e quattro batterie al Piombo da 12 V, Fig. I.1.

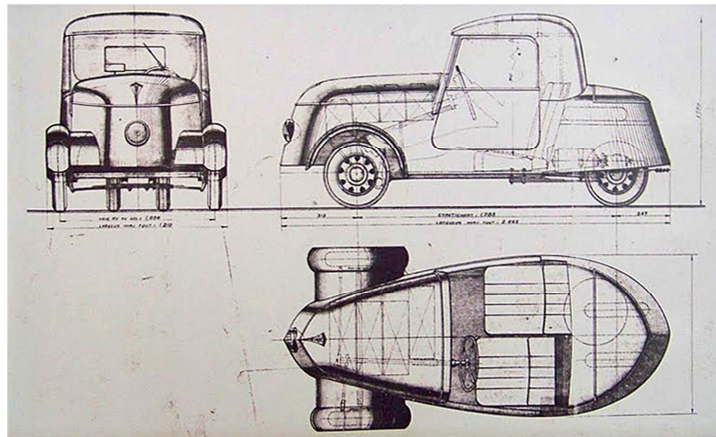


Fig. I.1 – Primo veicolo elettrico, Voiture Légère de Ville

Da lì in poi la ricerca si concentrò sui sistemi di accumulo, sulle infrastrutture di ricarica e sui modi di gestione di flotte di veicoli. In particolare la ricerca si consolidò maggiormente dalla metà degli anni settanta, quando la grande crisi petrolifera mondiale e la nascita di correnti di pensiero ambientaliste cercarono nuovi metodi di riduzione dell'inquinamento atmosferico, in particolare della concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'aria. Come si può notare nella Fig. I.2, la concentrazione di CO<sub>2</sub> è drasticamente aumentata soprattutto nell'ultimo decennio, portando ad un aumento della temperatura dell'aria.

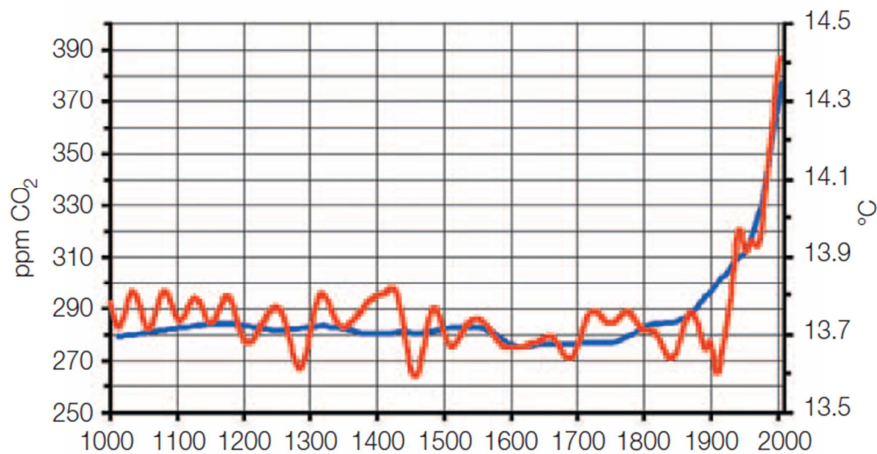


Fig. I.2 – Linea blu, aumento CO<sub>2</sub> in parti per milione; linea rossa, aumento temperatura negli ultimi 1000 anni

I veicoli elettrici possono essere una soluzione a questo continuo aumento di CO<sub>2</sub>, però non possono lavorare da soli, ma devono essere accompagnati da una nuova politica energetica. Questo perché, se i veicoli elettrici dovessero sostituire i veicoli con motore a propulsione interna, la richiesta di energia elettrica aumenterebbe, quindi bisognerebbe contenere le emissioni di CO<sub>2</sub> durante la fase di produzione dell'energia. Una soluzione è che l'energia elettrica utilizzata dagli EV deve provenire da fonti rinnovabili. Questo processo prende il nome di conversione "dalla sorgente alle ruote" (Weel-to-Wheel). Un altro provvedimento da apportare, per far sì che gli EV riducano le emissioni di CO<sub>2</sub>, è che la conversione dell'energia "dal serbatoio alle ruote" (Tank-to-Wheel) sia più efficiente che nei tradizionali veicoli. Questa condizione è già verificata, perché si può dimostrare che i veicoli con motore a combustione interna hanno un'efficienza energetica che varia tra il 15% ed il 20% poiché la maggior parte dell'energia consumata è persa nel calore dissipato e nelle perdite legate all'attrito del sistema meccanico di trasmissione. Il sistema di trazione elettrico, si avvale invece di un motore elettrico, che è molto efficiente e capace di convertire l'elettricità in energia meccanica con rendimenti fino al 90%. Questo ha portato a stimare l'efficienza Tank-to-Wheel compresa tra il 60-80%, in quanto si considerano ulteriori perdite di energia, tra cui le perdite di ricarica e l'autoscarica della batteria di trazione. Tornando alla conversione Weel-to-Wheel, al momento non è garantita poiché dipende da come l'energia elettrica viene prodotta, ovvero con emissione o meno di CO<sub>2</sub>. In Germania si è cercato di quantificare la riduzione di CO<sub>2</sub> ipotizzando tre diversi scenari di sostituzione di auto tradizionali con auto elettriche (sostituzione di 1, 10 o 20 milioni di auto tradizionali) a partire dal 2020 fino al 2030. Per le auto tradizionali è stato considerato uno scenario al 2020 con un'emissione media delle auto vendute a quella data, pari a 130 g di CO<sub>2</sub>/km. Supponendo di alimentare le auto elettriche con energia prodotta da fonti che non producono CO<sub>2</sub>, rinnovabili e nucleare, e sostituendo 20 milioni di auto tradizionali con auto elettriche, si eviterebbero più di 25 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> all'anno, ovvero si ridurrebbero le emissioni della Germania del 2,4%. Si è voluto evidenziare questa trattazione per mostrare come l'introduzione dei veicoli elettrici possa migliorare la qualità dell'aria, solo se si adottassero politiche energetiche adeguate. In questa tesi l'oggetto principale è la modellizzazione delle batterie al Litio. Una domanda che può sorgere ovvia è perché la modellizzazione delle

batterie al Litio possa aiutare alla penetrazione nel mercato dei veicoli elettrici. Per rispondere ad una domanda di questo tipo bisogna pensare alle difficoltà della propagazione degli EV. Come poco prima enunciato, il veicolo elettrico risente del problema dell'autonomia e delle tempistiche di ricarica: un EV in media può percorrere 150 km prima di procedere con una ricarica e la completa carica è in funzione della potenza fornibile dalla colonnina, e può essere lunga anche 6-8 ore. Numeri di questo tipo portano a dover creare una rete capillare di punti di ricarica. Questo implicherebbe di installare colonnine di ricarica nella maggior parte dei luoghi dove l'automobilista parcheggia il proprio veicolo (abitazioni, aziende, centri commerciali, autosilos, etc). Per questo motivo le colonnine dovranno possedere caratteristiche diverse in funzione della loro locazione. Ad oggi vi sono presenti colonnine per la ricarica privata e colonnine per la ricarica pubblica (es. stazioni di ricarica cittadina). La ricarica privata può essere concepita per l'uso di un solo EV e quindi adatta a ricaricare una sola batteria al Litio. Un punto di ricarica pubblico, d'altro canto, deve essere in grado di ricaricare un diverso numero di EV. Per questo motivo un veicolo che è in procinto di ricaricarsi deve scambiare delle informazioni che riescono a identificarlo univocamente. In questa tesi si vuole parlare delle informazioni che un veicolo deve concedere alla colonnina, focalizzandoci sull'informazione più importante che è la quantità di carica presente nella batteria nel momento in cui il veicolo procede con la carica. Questa informazione, come si vedrà nel seguito, è di fondamentale importanza nella gestione della ricarica, per questo motivo la colonnina deve essere in grado di riceverla. Ogni batteria dei veicoli elettrici possiede un sistema, chiamato BMS (Battery Management System), che controlla lo stato interno della batteria. Questo sistema è sicuramente in grado di fornire una stima dello stato di carica interna della batteria, ma non sempre è disponibile sui protocolli di comunicazione tra veicolo e colonnina. Questo è il motivo principale che ha spinto la creazione di una tesi incentrata sulla modellizzazione di una batteria al Litio. Nei capitoli a seguire, dopo una dettagliata panoramica sulle caratteristiche e sui modelli delle batterie al Litio, si sono eseguite delle prove sperimentali in grado di stabilire se vi è presente una correlazione tra la tensione ai morsetti della batteria e lo stato di carica residua, modellizzando la batteria con un circuito elettrico dinamico. Per fare queste prove si vuole descrivere come si è proceduto nell'allestire il banco prova per effettuare i test sperimentali. Infine dopo aver

valutato questa correlazione, indispensabile per una corretta gestione della ricarica dei veicoli, si è proceduto nello spiegare un sistema di gestione contemporanea di più cariche, il Green Up Manager di Bticino. Per far ciò è necessario scegliere un modello circuitale adattabile a più batterie, il quale è presentato semplificando il modello dinamico.





# 1. Accumulatori al Litio

## 1.1 Introduzione

La batteria è un particolare dispositivo che converte energia chimica, prodotta tramite una ossido-riduzione, direttamente in energia elettrica. Questa reazione coinvolge il transito di elettroni da una superficie ad una altra, tramite un particolare circuito elettrico. L'unità di base è la cella elettrochimica e la batteria è composta da tante di queste celle connesse in serie/parallelo in funzione del valore di capacità e di tensione da generare. La cella è composta da tre principali componenti, l'anodo, il catodo, e l'elettrolita, [1], [15]:

- **L'anodo** è l'elettrodo riducente, il quale cede l'elettroni al circuito esterno, ossidandosi durante la reazione elettrochimica. I materiali che vengono impiegati devono rispondere a requisiti, quali: conducibilità, capacità riduttiva, alta capacità specifica (Ah/g), stabilità, facilità di fabbricazione e bassi costi. I metalli rispondono adeguatamente a queste specifiche, in particolare lo Zinco ed il Litio (metallo leggero).
- **Il catodo** è l'elettrodo ossidante, il quale accetta elettroni dal circuito esterno, riducendosi durante la reazione elettrochimica. I materiali utilizzati devono avere una alta efficienza ossidante, e devono essere stabili quando sono in contatto con l'elettrolita. Per la maggior parte dei casi i materiali più usati sono ossidi metallici, mentre materiali alogeni e zolfo vengono usati in applicazioni più particolari.
- **L'elettrolita** si trova all'interno della cella e provvede al trasferimento di carica tra l'anodo ed il catodo. Esso deve avere una buona conducibilità ionica ma non deve condurre elettricamente altrimenti creerebbe un corto circuito tra anodo e catodo. L'elettrolita in più, non deve reagire con le cariche elettriche, deve far sì che le sue proprietà siano stabili al variare della temperatura ed infine deve avere bassi costi. I materiali utilizzati sono prevalentemente soluzioni acquose, ma vi sono anche soluzioni con sale fuso e altri elettroliti non acquosi, i quali vengono utilizzati per evitare che avvenga la reazione dell'anodo con l'elettrolita, nel caso in cui l'anodo fosse, per esempio di Litio.

Successivamente si vuole illustrare come avviene il transito di elettroni durante la scarica Fig. 1.1 e la carica Fig. 1.2 di una generica batteria.

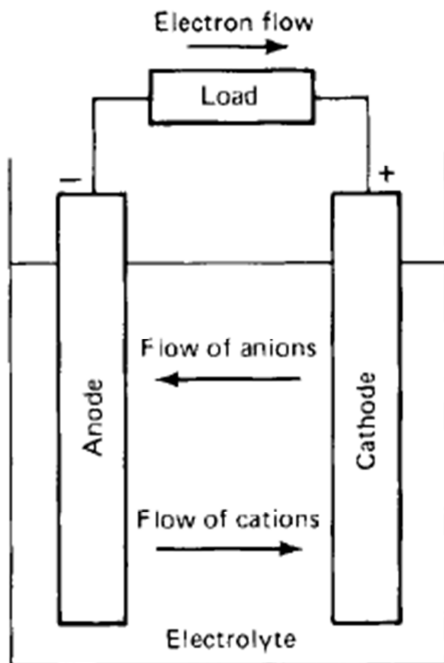


Fig. 1.1 – Processo di scarica

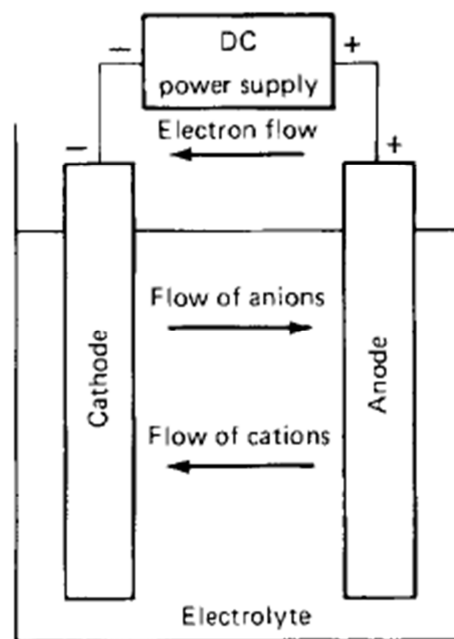


Fig. 1.2 – Processo di carica

Durante la scarica di una batteria, quindi quando essa è collegata ad un carico esterno, il flusso di elettroni parte dall'anodo, attraversa il carico esterno e confluisce al catodo. Mentre quando avviene la carica, il flusso di elettroni è invertito e l'elettrodo che era l'anodo diventa il catodo e viceversa.

Le batterie si dividono in primary batteries (batterie non ricaricabili), ed in secondary batteries (batterie ricaricabili). Ci si concentrerà sulle batterie ricaricabili, che sono quelle che vengono impiegate nei veicoli elettrici. Questi tipi di batteria sono comunemente conosciuti come "storage batteries" o "accumulators." Le secondary batteries, oltre ad avere la possibilità di essere ricaricate, hanno una alta densità di potenza, una curva di scarica relativamente piatta ed un buon funzionamento alle basse temperature. La densità di energia però è minore rispetto ad una batteria non ricaricabile.

Tramite un grafico si può apprezzare dove si posizionano le principali batterie in funzione dell'energia specifica e della densità di energia, sia per una batteria ricaricabile, che per una non ricaricabile Fig. 1.3, Fig. 1.4:

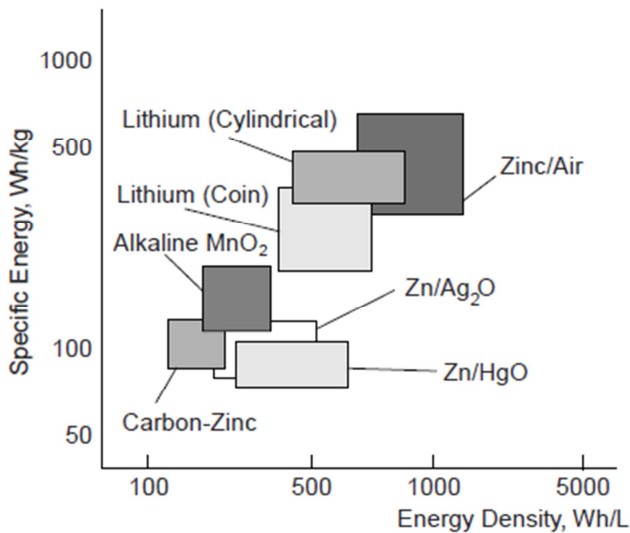


Fig. 1.3 – Batteria non ricaricabile

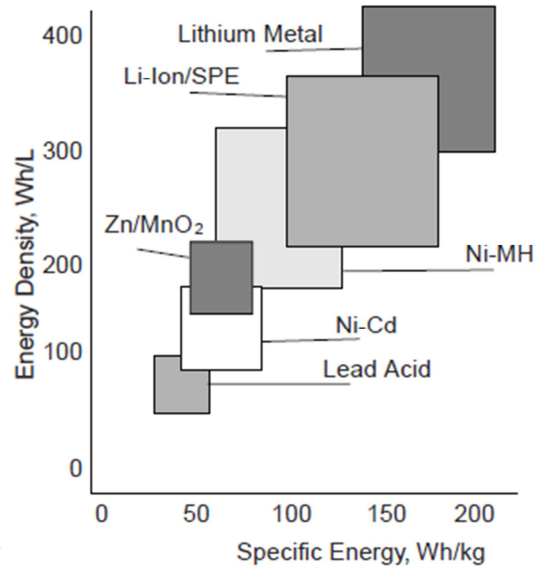


Fig. 1.4 – Batteria ricaricabile

Dai seguenti grafici si può notare quello detto in precedenza, cioè che le batterie non ricaricabili hanno un'energia specifica maggiore di quelle ricaricabili. Ora per capire quale batteria adottare in funzione dell'utilizzo, si può far riferimento al diagramma illustrato in Fig. 1.5. Esso rappresenta la collocazione delle varie tipologie di accumulatori in funzione delle prestazioni richieste, sotto forma di energia specifica (Wh/kg) e di potenza specifica (W/kg). Per applicazioni dove è richiesta una elevata potenza per poco tempo, gli accumuli più adatti sono rappresentati dai supercondensatori. Per le duali applicazioni, rappresentate da basse potenze per tempi più lunghi, le celle a combustibile sono gli accumuli più adeguati. Infine per le applicazioni intermedie dove si vuole un'elevata energia, ma d'altro canto avere anche un modesta potenza, gli accumuli da adottare sono rappresentati dalle batterie al litio, [22].

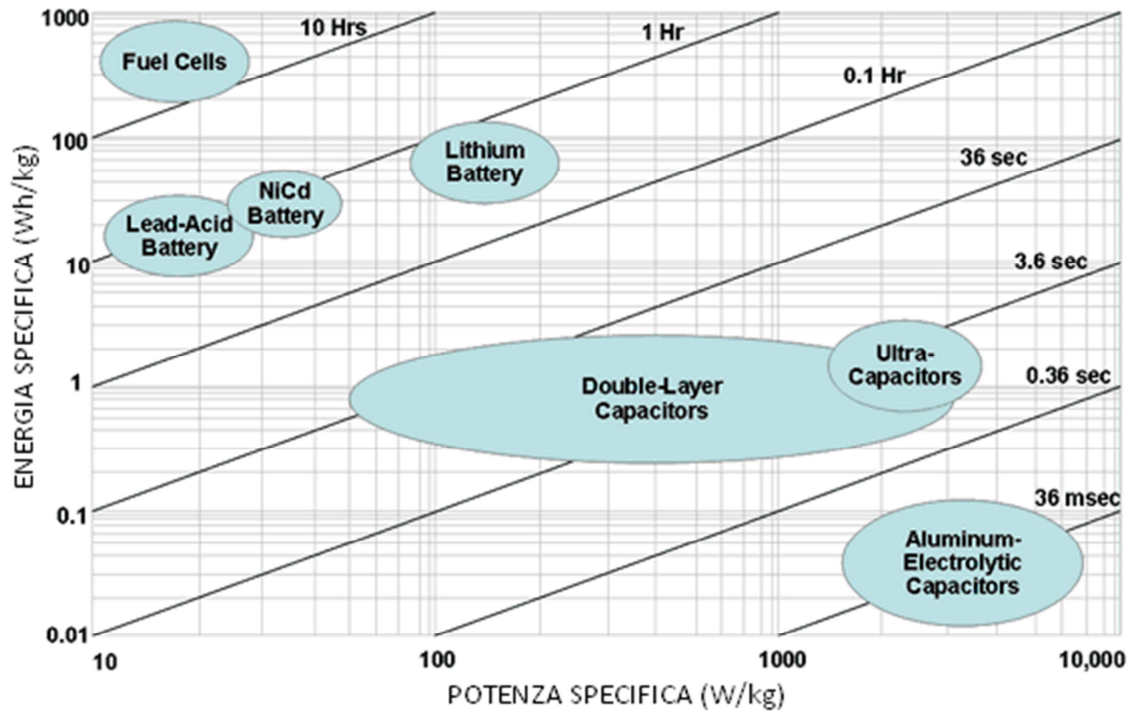


Fig. 1.5 – Diagramma di Ragone

Dopo questa visione generale del mondo delle batterie, si vuole entrare a parlare maggiormente delle batterie da adottare sui veicoli elettrici. Inizialmente si vogliono elencare le caratteristiche principali di queste batterie e poi nei paragrafi successivi si entrerà nel dettaglio della tecnologia ad oggi più impiegata sui veicoli elettrici, la tecnologia al Litio, per capire al meglio i suoi vantaggi, ma anche i suoi limiti. Le batterie per i veicoli elettrici devono avere le seguenti caratteristiche:

- Alta densità di energia, per ottenere una maggiore autonomia;
- Alta densità di potenza, per avere a disposizione quando richiesto una adeguata accelerazione;
- Il più lungo ciclo di vita con la minor manutenzione possibile;
- Capacità di accettare elevati picchi e rapidi cambi di potenza causati da una possibile ricarica rigenerativa;
- Bassi costi;
- Essere riciclabili, per rispetto dell'ambiente e per il conseguimento del loro fine, cioè l'abbattimento degli inquinanti.

Queste caratteristiche portano ad utilizzare batterie con celle litio-ione, con elettrolita liquido, o con elettrolita polimerico, ed anche un'ulteriore ed innovativa tecnologia che è quella della batteria sodio/cloruro di nichel (ZEBRA), che però non verrà discussa in questa trattazione.

## 1.2 Generalità batterie Litio

In commercio non esiste una sola batteria al litio ma moltissimi tipi che differiscono tra loro per materiali elettrodici e/o elettrolitici. L'unico elemento che unisce queste batterie è lo ione portatore della carica elettrica (ione Litio, Li<sup>+</sup>). Il litio è l'elemento avente il potenziale più negativo ( $E^0 = -3.045 \text{ V}$ ) e quindi, accoppiandolo a un altro elemento si ottiene una elevata differenza di potenziale, che è direttamente proporzionale all'energia di una cella. Il litio è un metallo alcalino, terzo elemento della scala periodica, con un modesto peso atomico, alta densità di energia [Wh/l] e una notevole reattività. Queste caratteristiche rendono, le batterie al Litio, adatte all'uso veicolare. Le batterie al litio vengono distinte in due principali categorie: al Litio-Metallico, oppure al Litio-Ione. Inizialmente le prime batterie al Litio erano tutte al Litio metallico. Esse però soffrivano di gravi problemi di sicurezza legati all'elevata reattività del Litio. Dagli anni Novanta, vi fu un importante sviluppo delle batterie al Litio, in quanto per la prima volta Sony commercializzò celle litio-ioni. Queste celle non contengono Litio, in forma metallica, in nessuno dei due elettrodi, garantendo così una maggiore sicurezza a parità di energia specifica. Nel paragrafi successivi si vuole fare una spiegazione dettagliata del funzionamento delle batterie Litio-Ione. Per le batterie Litio Metallico invece, si farà una descrizione più generale, in quanto questo tipo di batterie sono ancora in via di sviluppo, [7], [8].

### 1.2.1 Batterie Litio-Ione

Una batteria litio-ioni è composta da sottili strati costituenti il catodo, il separatore e l'anodo, immersi in un elettrolita che permette il trasporto degli ioni litio. Le celle Ioni Litio possono avere una struttura cilindrica, prismatica, oppure a bottone, come rappresentato nelle seguenti figure, Fig. 1.6-a, Fig. 1.6-b, Fig. 1.6-c.

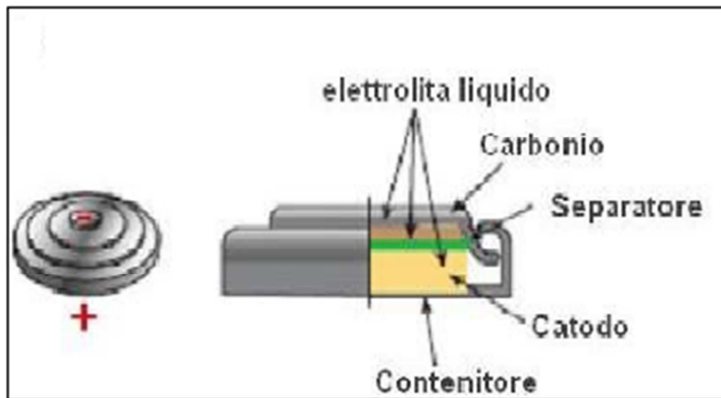


Fig. 1.6-a – Struttura a bottone di una batteria Lito-Ione

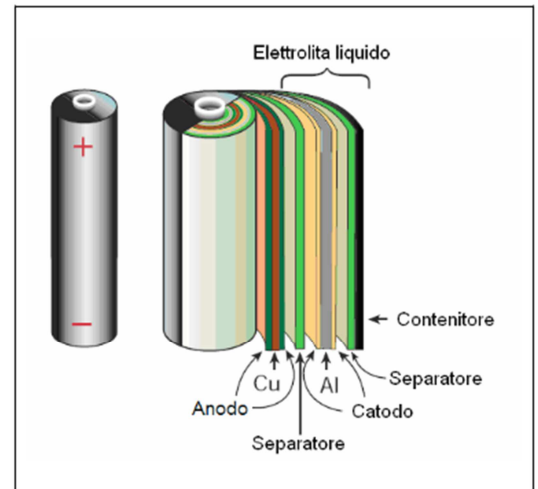


Fig. 1.6-b – Struttura cilindrica di una batteria Lito-Ione

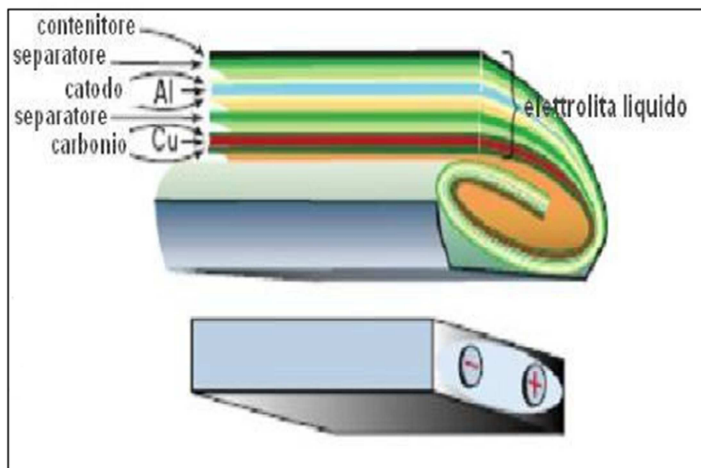


Fig. 1.6-c – Struttura prismatica di una batteria Lito-Ione

La struttura a bottone, Fig. 1.6-a, è utilizzata principalmente per le batterie con capacità molto piccole, mentre per capacità maggiori sono preferibili le altre due strutture. La struttura cilindrica, Fig. 1.6-b, permette di ottenere una vita utile superiore, con un costo di realizzazione contenuto, rispetto alle batterie con struttura prismatica. Le batterie prismatiche, Fig. 1.6-c, sono più adatte a formare moduli, grazie alla loro struttura che

favorisce la dispersione del calore, perché a parità di volume hanno una superficie di scambio termico maggiore<sup>1</sup>.

In modo più dettagliato:

- Il **catodo** è solitamente costituito da un ossido litiato<sup>2</sup> ( $\text{LiTMO}_2$  con  $TM = \text{Co, Ni, Mn}$ ), oppure da ferro fosfato<sup>3</sup>. I primi garantiscono una struttura a strati o a tunnel dove gli ioni litio possono essere inseriti ed estratti facilmente, ma presentano minore affidabilità e sicurezza rispetto al Ferro Fosfato. I vari tipi di materiali catodici sono:
  - Il diossido di cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ ) che è stato il materiale catodico più ampiamente usato per molti anni. Esso possiede una buona capacità di accumulare gli ioni litio, una buona reversibilità elettrochimica, fornisce una densità di energia ed un numero di cicli moderati, ha un'adeguata stabilità chimica ed una buona stabilità termica. Il diossido di cobalto però è meno termicamente stabile rispetto ad altri ossidi metallici o al fosfato e ciò lo rende altamente combustibile in caso di estreme condizioni d'uso. Per esempio valori di corrente troppo alti, possono generare un aumento incontrollato di temperatura o anche incendi. Inoltre è relativamente più costoso per kWh di energia accumulata rispetto ad altri ossidi. Queste caratteristiche lo rendono inadatto all'uso veicolare.
  - La tecnologia basata sul ferro fosfato, denominato LFP, possiede una elevata stabilità termica e chimica che fornisce caratteristiche di maggior sicurezza rispetto alle altre tecnologie litio-ione. Le celle ferro fosfato sono incombustibili nell'eventualità di errori di gestione durante la carica o scarica, sono più stabili in condizioni di sovraccarico o di corto circuito e

---

<sup>1</sup> Si può dimostrare che all'aumentare della superficie di scambio aumenta il calore scambiato; come descritto dalla seguente formula:  $Q = AU_T\Delta T$ .

Dove Q è il calore scambiato, A è la superficie di scambio termico,  $U_T$  è il coefficiente di scambio termico globale, e  $\Delta T$  è la differenza di temperatura. Questa è l'equazione che sta alla base della progettazione degli scambiatori di calore.

<sup>2</sup> Ossido litiato, oppure ossido di litio, è un composto chimico inorganico, prodotto con la combustione del litio in aria, insieme a piccole parti di Perossido di Litio ( $\text{Li}_2\text{O}_2$ ).

<sup>3</sup> Ferro fosfato, composto chimico,  $\text{LiFePO}_4$ .

possono resistere ad alte temperature. Quando avviene un abuso, il materiale catodico a base di fosfato non rilascia ossigeno, non brucia ed è molto meno suscettibile ad un aumento incontrollato della temperatura. Le celle ferro fosfato hanno una densità di energia inferiore a quelle al cobalto. In compenso possono sopportare correnti più elevate e quindi potenze maggiori. Inoltre offrono una vita più lunga e costituiscono un significativo miglioramento in termini di costo, sicurezza e tossicità.

- L'ossido di Manganese Spinello ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  o, più propriamente,  $\text{Li}_x\text{Mn}_{2-x}\text{O}_4$ ), denominato LMO, rispetto alle chimiche basate sul cobalto è termicamente e chimicamente più stabile, in virtù della stabilità intrinseca della sua struttura cristallina, ed ha una potenza superiore, grazie alla migliore capacità d'inserzione dello ione litio nella struttura. Invece la densità di energia e ed il numero di cicli di vita sono inferiori. Il Manganese, a differenza del cobalto, è un materiale catodico sicuro e rispettoso dell'ambiente. Infine, un'altra caratteristica del LMO, è che ha costi relativamente bassi.
- L'ossido di nichel ( $\text{LiNiO}_2$ ) ha una capacità specifica ed un potenziale molto più alti rispetto al cobalto, ma ha molti problemi di sicurezza ed è molto meno stabile. Per ottenere un compromesso di prestazioni, costo e sicurezza, può essere stabilizzato con aggiunta di cobalto ed alluminio, formando il composto  $\text{LiNiCoAlO}_2$ , chiamato NCA, oppure cobalto e manganese, formando il composto  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ , sufficientemente stabili per essere usati negli accumulatori. Complessivamente la capacità e la densità di energia sono superiori a quelle del ferro fosfato e del diossido di cobalto. In termini di densità di potenza le prestazioni elettrochimiche sono migliori di quelle del  $\text{LiCoO}_2$ , ma non sono così alte come quelle del  $\text{LiFePO}_4$ .
- **L'anodo** è generalmente costituito da grafite allo stato litiato<sup>4</sup>, in cui ogni atomo è legato ad altri tre in un piano composto da anelli esagonali fusi assieme, i quali

---

<sup>4</sup> Grafite allo stato litiato, composto chimico, ( $\text{Li}_x\text{C}_6$  con  $0 < x < 1$ ).



uniti alla delocalizzazione della nuvola elettronica<sup>5</sup> conducono elettricità. Più nel dettaglio i vari tipi di materiali catodici sono:

- **La grafite**, la quale presenta una struttura a strati, con piani di atomi disposti in strutture esagonali fortemente legati tra loro, mentre i vari piani sono tenuti assieme da legami deboli. Dal momento che gli ioni di Litio si legano più debolmente alla grafite che agli ossidi metallici<sup>6</sup>, il loro spostamento verso il catodo durante la scarica è energeticamente favorito. Durante la carica questa tendenza è invertita.
- **Il Titanato di litio ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ )**, il quale è denominato anche LFO. È un anodo compatibile con tutte le tipologie di catodo suddette, ma è generalmente usato in congiunzione con materiali a base di manganese. LFO offre potenza elevata combinata con un ampio range delle temperature di esercizio dovuto ad una grande stabilità termica, ed è considerato un'alternativa più sicura all'anodo in grafite. Esso possiede accelerati tempi di ricarica, ed una lunga vita dell'accumulatore rispetto alle batterie di altre tecnologie. Nessuna interazione indesiderata avviene con l'elettrolita: questo consente alla batteria di essere caricata molto rapidamente, senza il rischio di corto circuiti o fuga termica. Però, l'energia di questo tipo di batterie con l'anodo di litio titanato risulta essere leggermente inferiore rispetto a quella delle batterie con anodo basato sulla grafite.
- **L'elettrolita** può essere liquido oppure polimerico. L'elettrolita liquido è composto tipicamente da sali di litio, come l'esafuorofosfato di litio ( $\text{LiPF}_6$ ), disciolti in una miscela di solventi organici (carbonato di dimetile<sup>7</sup> e di etilene<sup>8</sup>). I separatori sono

---

<sup>5</sup> Nuvola elettronica, questo concetto deriva dalla fisica quantistica e dal principio di indeterminazione. Nasce per descrivere la probabilità che un elettrone si trovi in una determinata posizione e che ruoti intorno al nucleo con una determinata velocità.

<sup>6</sup> Ossidi metallici, composto chimico binario, che si ottiene con l'ossidazione dell'ossigeno con un elemento metallico.

<sup>7</sup> Carbonato di dimetile, chiamato anche dimetilcarbonato DMC, è un liquido incolore e dall'odore caratteristico, biodegradabile e poco tossico. Può essere sintetizzato facendo reagire il metanolo con fosgene o metilcloroformiato in soluzione concentrata di idrossido di sodio.

usualmente membrane microporose fatte di polietilene o polipropilene<sup>9</sup>. A causa della bassa conducibilità degli elettroliti organici, un'adeguata potenza della cella o della batteria può essere ottenuta solamente con elettrodi e separatori che sono molto più sottili di quelli usati nelle batterie con elettroliti acquosi. La necessità di elettrodi sottili ha determinato la formazione di batterie con l'avvolgimento a spirale. Però in questi anni si stanno studiando configurazioni di cella piatta impacchettata in involucri in plastica. Gli elettroliti polimerici, sono simili ad un film plastico che non conduce elettroni ma consente lo scambio ionico. L'elettrolita polimerico sostituisce il tradizionale separatore poroso, che è imbevuto con l'elettrolita. Il progetto del polimero secco offre semplificazioni a riguardo della costruzione, robustezza, sicurezza e geometria con spessore sottile. Però il polimero secco garantisce bassa conducibilità, quindi la resistenza interna è troppo alta e non è possibile avere alte correnti, quindi l'elettrolita liquido viene fuso in una matrice polimerica ospitante per formare un gel, garantendo le medesime prestazioni dell'elettrolita liquido ma con un maggiore grado di sicurezza intrinseca.

- **La membrana separatrice** è costituita normalmente da polietilene o polipropilene.
- **I collettori di corrente** sono generalmente costituiti da metalli che non devono reagire con l'elettrolita e sono solitamente di rame per l'anodo e di alluminio per il catodo.

Quindi variando i materiali anodici e catodici si possono variare le caratteristiche della batteria come la tensione di lavoro e la capacità specifica [4], come mostrato in tabella, Fig. 1.7.

---

<sup>8</sup> Etilene C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, è un idrocarburo, cioè è un composto organico formato solamente da atomi di carbonio ed idrogeno, contenente un doppio legame C=C.

<sup>9</sup> Polietilene PE e polipropilene PP. Sono polimeri, cioè macromolecole (molecola dall'elevato peso molecolare) costituita da tanti gruppi molecolari uguali, che sono uniti insieme da legami covalenti che formano lunghe catene.

Sistema	NCA grafite	LFP Grafite	MNS TiO	MN Grafite
Elettrodi Positivo Negativo	LiNi <sub>0.8</sub> Co <sub>0.15</sub> Al <sub>0.05</sub> Grafite	LiFePO <sub>4</sub> Grafite	LiMn <sub>1.5</sub> Ni <sub>0.5</sub> O <sub>4</sub> Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	Li <sub>1.2</sub> Mn <sub>0.6</sub> Ni <sub>0.2</sub> O <sub>2</sub> Grafite
Capacità [mAh/g] Positivo Negativo	155 290	162 290	130 170	275 290
Tensione [V] al 50% SOC	3.6	3.35	3.14	3.9
Sicurezza	Discreta	Buona	Eccellente	Eccezionale
Costo	Moderato	Moderato	Moderato	Moderato
NCA=Nichel-Cobalto, Alluminio; LFP=Litio Ferro Fosfato; MNS=Manganese Spinello; MN=Manganese Ossido;SOC=Stato di carica (State of charge)				

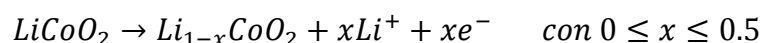
Fig. 1.7 – Caratteristiche di diverse batterie in funzione della composizione degli elettrodi

In tutte le batterie al litio durante le reazioni di ossidoriduzione associate ai processi di carica e scarica, gli ioni litio migrano da un elettrodo all'altro reversibilmente. Quando la cella è completamente scarica tutto il litio presente è contenuto nel catodo, salvo la quantità contenuta nei sali costituenti l'elettrolita.

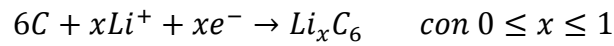
Durante il processo di carica dell'accumulatore lo ione litio viene estratto dall'ossido metallico costituente il catodo e trasferito all'anodo, mentre gli elettroni migrano dal catodo all'anodo attraverso il circuito esterno, il metallo del catodo viene quindi ossidato, [2], [3]. All'anodo, il processo di carica determina l'intrappolamento dello ione litio, che si riduce a litio nella matrice di grafite acquisendo gli elettroni provenienti dal circuito esterno.

Nello specifico, durante la carica, avvengono le seguenti reazioni:

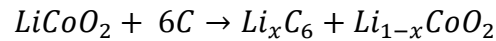
- AL CATODO



- ALL'ANODO



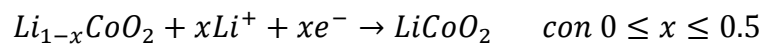
- LA REAZIONE COMPLESSIVA



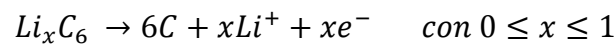
Durante la scarica il litio intercalato nella matrice di grafite si ossida rilasciando all'esterno gli elettroni mentre gli ioni litio migrano attraverso l'elettrolita al catodo che viene ridotto.

Nello specifico, durante la scarica, avvengono le seguenti reazioni:

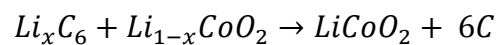
- AL CATODO



- ALL'ANODO



- LA REAZIONE COMPLESSIVA



Durante il primo ciclo di carica, oltre al trasferimento degli ioni litio nella grafite, si forma anche uno strato passivante tra elettrolita ed elettrodo negativo, denominato SEI (Solid Electrolyte Interface), composto da ossidi, idrossidi<sup>10</sup>, carbonati<sup>11</sup> e fluoruri<sup>12</sup>. Questo

<sup>10</sup> Idrossidi, composti ternari formati da metallo, ossigeno ed idrogeno.

<sup>11</sup> Carbonati, sono sali derivati dall'acido carbonico è un ossiacido poco stabile in cui l'atomo centrale è il carbonio.

<sup>12</sup> Fluoruri, sono sali che contengono lo ione fluoro.

strato è importante per le prestazioni delle batterie poiché influenza il numero di cicli, la capacità e la sicurezza. Il processo di carica e scarica di un accumulatore Litio-Ione, per una cella con catodo in ossido litiato di cobalto  $\text{LiCoO}_2$  ed anodo in grafite ed elettrolita allo stato liquido, è rappresentato nella Fig. 1.8.

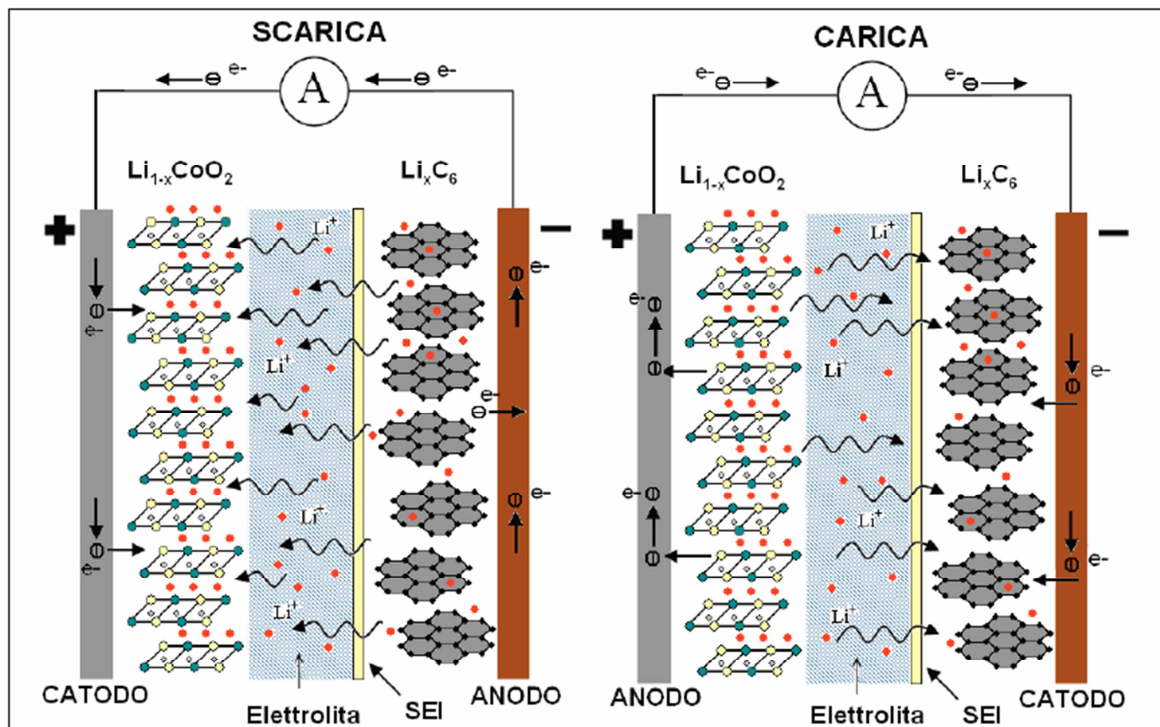


Fig. 1.8 – Processo di carica e scarica di una batteria Litio-Ione

Infine per terminare la descrizione sulle batterie al Litio – Ione, si vuole parlare delle loro prestazioni. Esse hanno un'energia specifica che varia tra 100 – 180 Wh/kg ed una densità di energia tra 200 – 380 Wh/l. Per quanto riguarda la potenza, essa dipende dal tipo di utilizzo che deve fare la batteria, nel caso si considerasse una batteria per applicazioni di potenza, la potenza specifica può arrivare a valori di picco pari a 2000 W/kg.

### 1.2.2 Batterie Litio-Metallico

Questi tipi di accumulatori hanno l'anodo composto da Litio Metallico, quindi con potenziale standard, rispetto all'idrogeno, più negativo, con una capacità specifica che può essere nell'ordine di 3850 Ah/kg, dovuta ad un peso atomico molto basso. In più, nel catodo di questi accumulatori non è presente composto litiato e di conseguenza hanno

capacità superiori rispetto a quelli Litio Ione. Questi vantaggi fanno pensare che, le batterie Litio Metallico, siano la tecnologia del futuro, soprattutto per le applicazioni veicolari (BEV). Però questo tipo di accumulatori ha un grosso problema, la formazione di dendriti<sup>13</sup> che possono provocare un corto circuito interno. I dendriti sono dovuti alla disomogeneità del SEI. Queste protuberanze crescono raggiungendo il catodo, provocando un corto circuito che può far esplodere la cella. Per risolvere questo critico problema, si potrebbe pensare di sostituire l'elettrolita liquido con uno solido, come per esempio un polimero. Questa soluzione ha portato alla creazione di batterie di Litio metallico con elettrolita polimerico. Le celle con elettrolita polimerico presentano una struttura completamente costituita da fogli flessibili (struttura piatta) e spesso pieghevoli (laminato polimerico), Fig. 1.9. Esse, proprio perché costituite da film plastici flessibili, si adattano a tutte le forme e vengono costruite con processi semplici e quindi meno costosi. Le celle polimeriche essendo molto sottili sono adatte a formare moduli e quindi possono raggiungere anche capacità considerevoli.

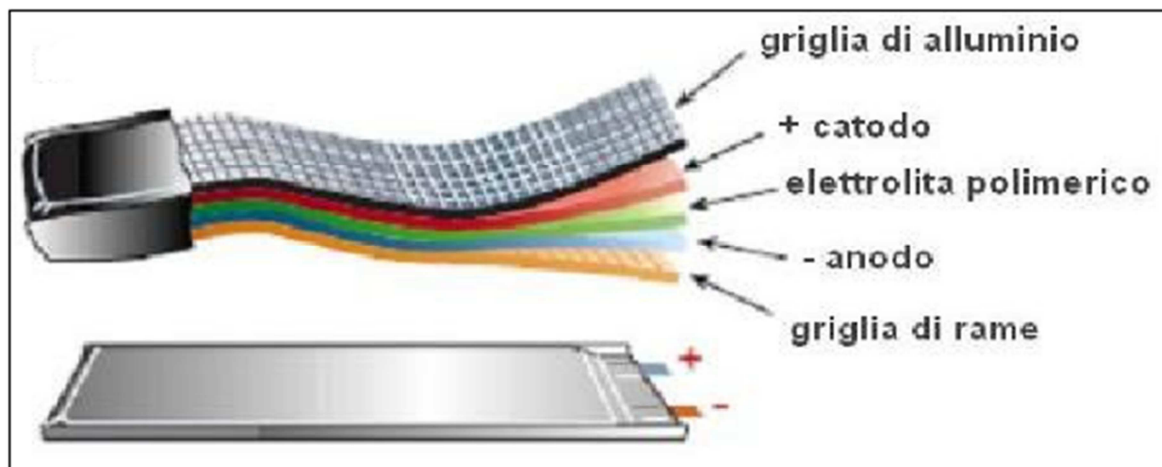


Fig. 1.9 – Struttura di una batteria litio-Metallico

Gli elettroliti polimerici sono costituiti da una matrice polimerica ed un sale di Litio. Quello più conosciuto è quello PEO (base di polietilene ossido), che presenta una buona

<sup>13</sup> Una dendrite è una struttura ad albero caratteristica di cristalli formati nella solidificazione di metalli e leghe metalliche. La sua forma è legata alla rapida crescita del cristallo lungo direzioni cristallografiche energeticamente favorevoli.

conducibilità a temperature superiori ai 70°C. Una soluzione di questo tipo riduce, la possibilità della formazione di dendriti, rispetto alle celle con elettrolita liquido. Gli accumulatori al Litio Metallico con elettrolita polimerico a base di polietilene ossido, sono stati per molti anni i candidati ideali da impiegare sui veicoli elettrici, avevano però l'unico difetto che era rappresentato dal costo troppo elevato. Questo perché la batteria operava bene solo alle elevate temperature e quindi necessitava di un sistema di riscaldamento e successivamente di smaltimento del calore. Una soluzione per incrementare le prestazioni a temperature medio basse è l'aggiunta di liquidi ionici<sup>14</sup>. Questa soluzione è ancora in via sperimentale, ma è risultata un approccio interessante al fine di incrementare le prestazioni delle batterie litio-polimero alla temperatura ambiente.

### 1.3 Andamento della tensione durante la scarica

Un metodo classico per rappresentare la curva di scarica di una batteria è tracciare il valore di tensione ai morsetti della batteria in funzione dello stato di scarica della batteria stessa (SOD – State Of Discharge), oppure in funzione della capacità della batteria, con una temperatura ed una corrente costante. Se invece si facesse un certo numero di prove, con un diverso valore di temperatura, ma con lo stesso valore di corrente, si potrà capire come varia la tensione con la temperatura di lavoro della batteria. Mantenendo costante la temperatura, e facendo più prove, ognuna con un diverso valore di corrente, si può capire l'andamento della tensione in funzione della corrente di scarica [5], [6], [9]. Per la maggior parte degli accumulatori elettrolitici l'andamento della tensione in funzione della carica estratta può essere rappresentato come in Fig. 1.10. Si può notare che la tensione parte dal valore  $E_{full}$ , che vi è ai capi della cella quando essa è completamente carica ed, per un primo tratto, la tensione ha un andamento di tipo esponenziale decrescente, fino al raggiungimento del valore di tensione denominato  $E_{top}(Q_{top})$ . Successivamente la tensione ha un andamento più lineare per la maggior parte della scarica, finché non raggiunge il valore tensione pari alla tensione nominale  $E_{nom}$ . Infine essa decresce, con una funzione non lineare, fino al raggiungimento della tensione

---

<sup>14</sup> Composti chimici costituiti esclusivamente da ioni, i quali sono sali che hanno una temperatura di fusione inferiore a 100°. I liquidi ionici che presentano una temperatura di fusione inferiori alla temperatura ambiente prendono il nome di RTIL (Room Temperature Ionic Liquids).

minima ( $E_{cut-off}$ ), la quale si ha quando la carica estratta dalla batteria è pari alla carica massima estraibile  $Q_{max}$ , che avviene quando la batteria è completamente scarica, [20].

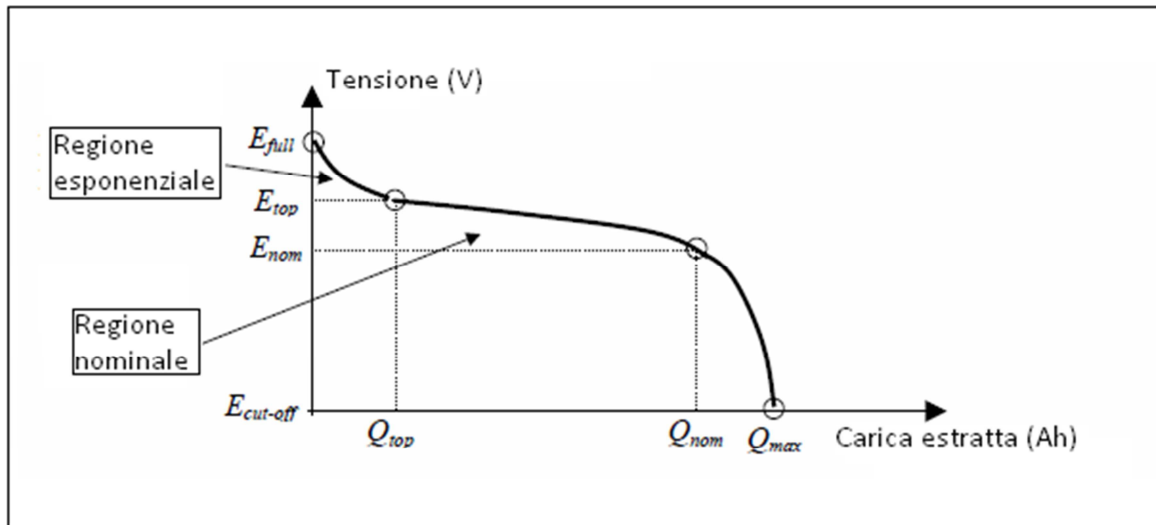


Fig. 1.10 – Andamento della tensione di un generico accumulatore

Successivamente si vuole mostrare l'andamento della tensione di scarica di una cella agli Ioni di Litio, con una capacità nominale di 5,3 mAh ed una tensione nominale di 3,5 V, mostrata in Fig. 1.11 [23], per poterla confrontare con la curva rappresentata nella figura precedente, Fig. 1.10. Confrontandole si può notare come una cella al Litio abbia la regione esponenziale quasi completamente assente, questa è una delle cause per le quali una cella agli Ioni di litio ha una tensione media, ai capi dei suoi morsetti, maggiore di una cella, per esempio al Ni-Cd. Questo è un grande vantaggio delle celle al Litio, in tutte quelle applicazioni in cui si vogliono avere tensioni operative ai morsetti della batteria elevate, utilizzando il minor numero di celle e quindi, a parità di potenza, avere un peso ed un volume della batteria minore. Se si andasse al di sotto di questo valore minimo di tensione, effetto "Under Voltage", gli elementi chimici presenti nelle batterie sarebbero stressati, tanto da causare una eccessiva scarica che potrebbe provocare la rottura degli elettrodi, portando ad un possibile cortocircuito tra essi.



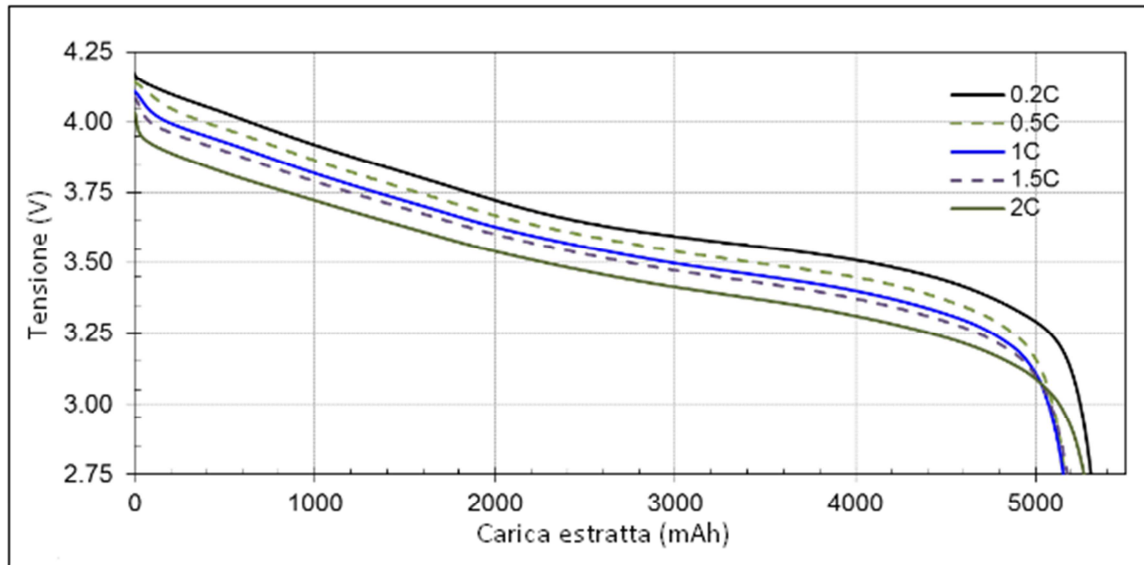


Fig. 1.11 – Andamento della tensione di una batteria Litio-Ione

Come si può notare nella Fig. 1.11, al variare della corrente di scarica, variano i profili di tensione. I valori della corrente di scarica sono espressi in funzione della capacità della batteria,  $X \cdot C$ . Dove  $C$  è la capacità nominale della batteria, ed  $X$  è un fattore moltiplicativo. Per esempio una batteria con una capacità di 50 Ah e con una curva di scarica con una corrente pari a 2C, ha una corrente di scarica pari a 100 A. Più la corrente di scarica di una batteria aumenta, più la tensione ai capi della batteria diminuisce. Per spiegare ciò bisogna immaginare una batteria come un generatore di tensione ideale con in serie un'impedenza equivalente, se la corrente di scarica aumenta, la caduta di tensione ai capi dell'impedenza aumenta e di conseguenza la tensione ai capi della batteria diminuisce.

La curva appena descritta rappresentava la tensione ai capi della batteria in funzione della capacità della batteria stessa, ma un altro modo per descrivere la tensione è in funzione di un particolare parametro SOD (state of discharge). Il SOD è un parametro che descrive lo stato di scarica di una batteria, ed è uguale a 0 quando la batteria è completamente carica, mentre è uguale a 1 quando la batteria è completamente scarica. Esso è rappresentabile dalla seguente formula:

$$SOD = \frac{C_E}{C_N}$$

Dove  $C_E$  è la carica estratta dalla batteria durante la scarica, mentre  $C_N$  è la capacità nominale della batteria. Logicamente più la corrente di scarica aumenta, più la batteria viene scaricata in meno tempo, Fig. 1.12, perché si richiede una maggiore potenza. La corrente di scarica però, fa aumentare la temperatura di lavoro, la quale influisce sulla tensione ai morsetti della cella, Fig. 1.13. Per questo motivo è importante dover raffreddare la batteria, così da cercare di contenere la temperatura di lavoro all'interno del range di temperature ammissibili. Questo deve essere fatto soprattutto in quelle applicazioni dove la batteria viene scaricata a fondo, come per i veicoli elettrici, perché come si nota in Fig. 1.12, a fine scarica la temperatura aumenta più rapidamente.

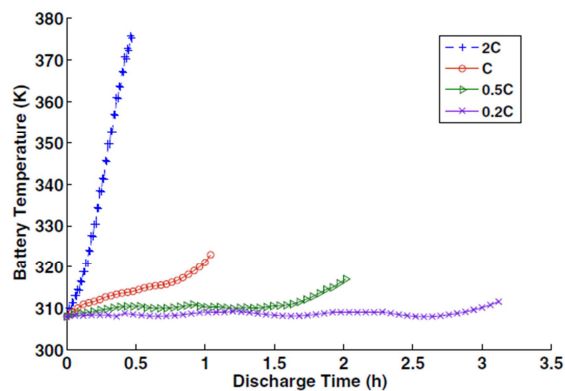


Fig. 1.12 – Andamento della temperatura durante la scarica

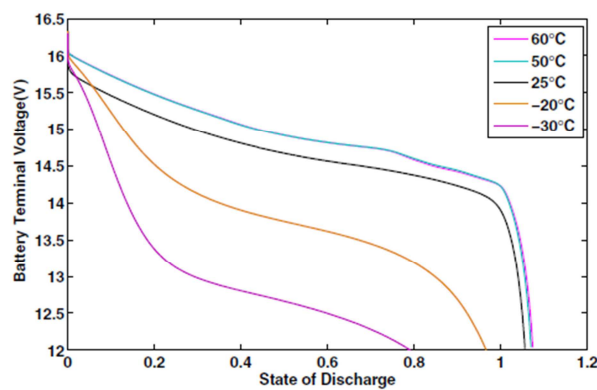


Fig. 1.13 – Andamento della tensione in funzione della temperatura e dello stato di scarica

Il problema della temperatura però è più delicato di quanto appena descritto, perché una batteria al Litio, può avere problemi sia alle alte, ma anche alle basse temperature. Se il funzionamento è in bassa temperatura, la velocità con cui avvengono le reazioni chimiche è minore<sup>15</sup>, e quindi la capacità di trasporto della corrente si riduce diminuendo quindi l'energia estraibile dalla cella. In più l'esposizione prolungata a temperature basse, al di sotto della temperatura consentita, può portare a perdite di capacità irreversibili. Se il funzionamento avviene ad alte temperature, la potenza estraibile dalla cella aumenta, perché aumenta la velocità con cui avvengono le reazioni chimiche (secondo la legge di Arrhenius). Quindi a parità di corrente, la tensione ai capi della cella aumenta, facendo aumentare a sua volta la temperatura. Scatta quindi un "effetto a valanga" che se non controllato può portare all'esplosione della cella, [19].

#### 1.4 Caratteristiche tensione e corrente durante la carica

La carica delle batterie al Litio, può essere vista simile alla carica delle batterie al Piombo, con due differenze sostanziali, la prima è che la tensione ai capi di una cella al Litio è molto maggiore di una al Piombo, e la seconda è che la tensione di cut-off è un limite quasi rigido ed invalicabile, altrimenti si rischia di danneggiare gravemente la batteria riducendone la vita, [10], [16], [17]. Un esempio di tensione di cut-off per una cella al Litio è pari a 4,2 V, con una tolleranza di  $\pm 50\text{mV}$ , quindi un margine molto piccolo  $\approx 1,2\%$ .

La carica delle batterie può avvenire in vari modi, ma bisogna fare attenzione durante la carica, perché la vita utile della batteria dipende fortemente anche dagli stress causati da cariche non controllate. Per le batterie al Litio alcune modalità di carica sono da escludere come la carica ad impulsi, la quale crea dei picchi di tensione troppo elevati che possono accorciare la vita di queste batterie. Il modo classico e più utilizzato, per procedere con la carica di batteria al Litio si divide in due parti, una a corrente costante ed una a tensione costante, Fig. 1.14:

<sup>15</sup> La velocità con cui avvengono le reazioni chimiche dipende dalla temperatura, secondo l'equazione di Arrhenius: l'equazione di Arrhenius è un'equazione esponenziale, che mette in relazione la costante di velocità  $k$  con la variazione di temperatura.

$$k = k_0 e^{-\frac{\Delta E}{RT}}$$

- A CORRENTE COSTANTE, viene imposta una certa corrente, la quale fa aumentare la tensione ai morsetti della batteria stessa fino al raggiungimento della tensione massima sopportabile.
- A TENSIONE COSTANTE, una volta raggiunta la tensione massima, non si impone più una corrente, ma si applica una tensione costante ai terminali della batteria, pari alla tensione massima. Durante questa fase la corrente decrescerà, e la carica della batteria terminerà una volta raggiunto il valore minimo della corrente, che di solito è circa il 3% della corrente nominale.

Oltre a queste due fasi, ci può essere un'ulteriore fase che precede quella a corrente costante, essa prende il nome di fase di sveglia o "boost". Questa fase viene applicata quando una batteria al litio si è "addormentata", cioè quando, durante la fase di scarica, si è raggiunta una tensione minore della tensione di cut-off. Questa condizione può avvenire anche quando la batteria è sottoposta a lunghi periodi di inattività, perché l'autoscarica può portare la tensione al di sotto della tensione minima. In questa fase viene applicata una piccola corrente che fa aumentare la tensione e permette di raggiungere il valore minimo di cut-in. Sempre in riferimento alla Fig. 1.14 si può apprezzare come varia la tensione durante il periodo di non attività, come si nota essa diminuisce a causa dell'effetto dell'autoscarica.

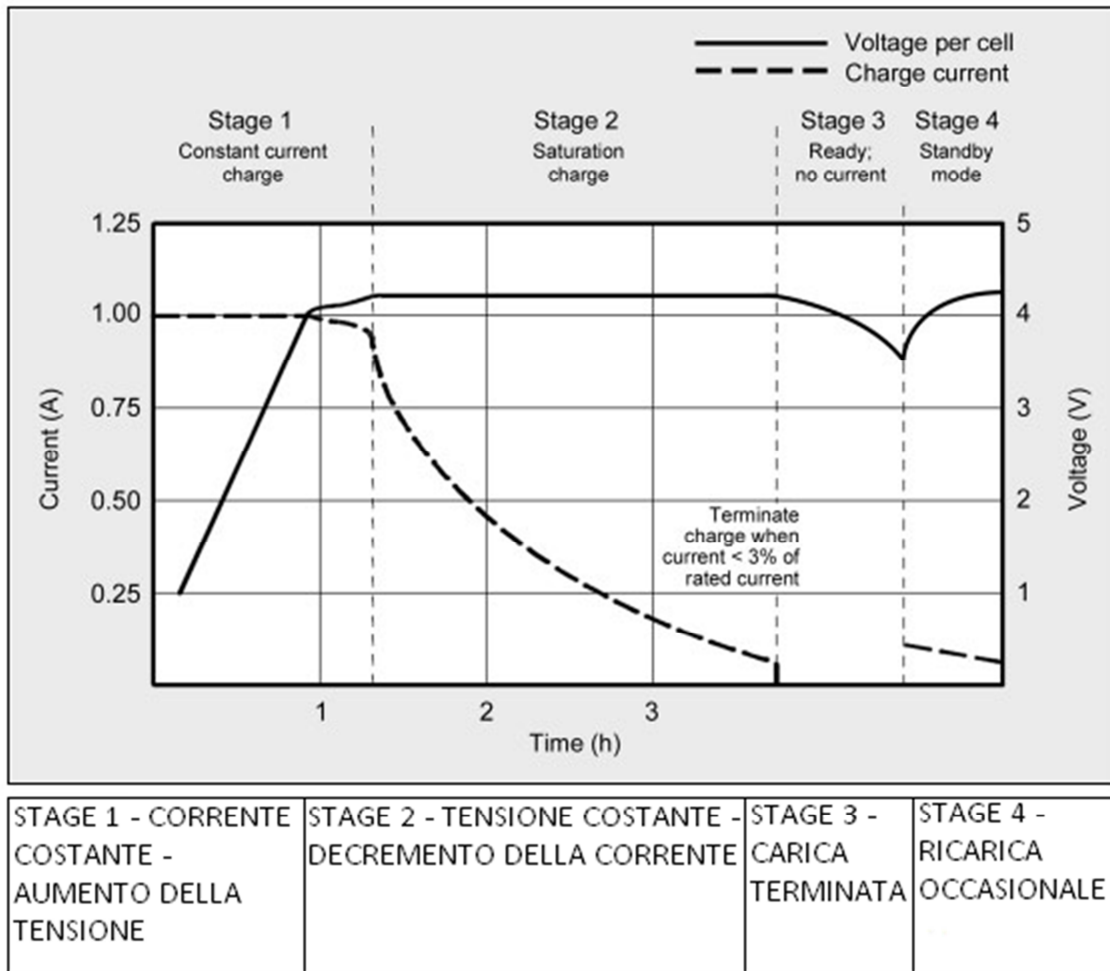


Fig. 1.14 – Caratteristica di carica

Come detto in precedenza e come si nota nella Fig. 1.14 la tensione non supera la tensione massima. Ma nel caso venisse oltrepassata per un tempo prolungato, si formerebbe una “placcatura” di litio metallico sull’anodo, mentre il catodo diventerebbe un agente ossidante, perdendo stabilità e producendo anidride carbonica  $\text{CO}_2$ . Questo fa aumentare la pressione della cella, e se la carica continuasse un dispositivo di sicurezza, chiamato CID (current interrupt device), interromperebbe la corrente, quando la pressione arriva a circa 1,380 kPa (200psi). Se il dispositivo non interrompesse il flusso di corrente entrante la pressione continuerebbe ad aumentare, e se raggiungesse la soglia di circa 3,450 kPa (500psi), la cella potrebbe prendere fuoco.

Per quanto riguarda le tempistiche di ricarica, esse possono variare, si formano così tre macro tipologie di ricarica, ricarica lenta, ricarica rapida, e ricarica veloce:

- RICARICA LENTA, viene applicata una corrente pari a  $0,1C$ , quindi le tempistiche di ricarica sono molto lente anche pari a 12 – 14 ore. I caricabatterie sono molto semplici e non rilevano quando la batteria è completamente carica. Questo comporta, soprattutto per batteria con grandi capacità, di non essere in grado di raggiungere una carica completa e quindi perdere in autonomia.
- RICARICA RAPIDA, viene applicata una corrente pari a  $0,3C$ , le tempistiche di ricarica qui diminuiscono arrivando a caricare una batteria in circa 3 – 6 ore. Qui i caricabatterie sono provvisti di un sistema che segnala quando la batteria raggiunge la carica completa.
- RICARICA VELOCE, viene applicata una corrente pari a  $1C$ . Questo elevato valore di corrente permette di arrivare ad ottenere la tensione massima in circa 1 ora, poi inizia la fase a tensione costante. Ma con questo sistema si riesce ad ottenere una buona percentuale di carica in un tempo relativamente breve. Questo tipo di ricarica è molto importante per le batterie di elevata capacità, come quelle impiegate nei veicoli elettrici. Un'ulteriore evoluzione di questo tipo di ricarica è rappresentata dalla ricarica ultra rapida, nella quale viene impiegata una corrente che varia da  $1C$  –  $10C$ . Una ricarica ultra rapida ha però dei limiti perché:
  - La batteria deve essere in ottime condizioni, cioè deve avere un buon bilanciamento di carica<sup>16</sup>, questo esclude la possibilità di effettuare una ricarica ultra rapida alle batterie vecchie.
  - La temperatura di lavoro deve essere moderata e tenuta costantemente sotto controllo.
  - La ricarica rapida è applicabile solo alla parte di ricarica a corrente costante.
  - Ogni volta che la batteria viene caricata con una ricarica ultra rapida la sua vita si degrada consistentemente. Questo verrà discusso in modo più approfondito nel paragrafo successivo.

---

<sup>16</sup> Il bilanciamento di carica, viene fatto nelle batterie perché esse sono costituite da un insieme di celle connesse in serie ed in parallelo, questo termine verrà spiegato in modo più dettagliato nel paragrafo 1.6.

## 1.5 Invecchiamento

La capacità di accumulo di una batteria, dichiarata dal costruttore, è un dato che non è costante nel tempo, ma essa diminuisce in funzione di come viene utilizzata la batteria. In modo più dettagliato gli agenti che provocano questo invecchiamento sono indicati in Fig. 1.15, [11], [12], [13], [14].

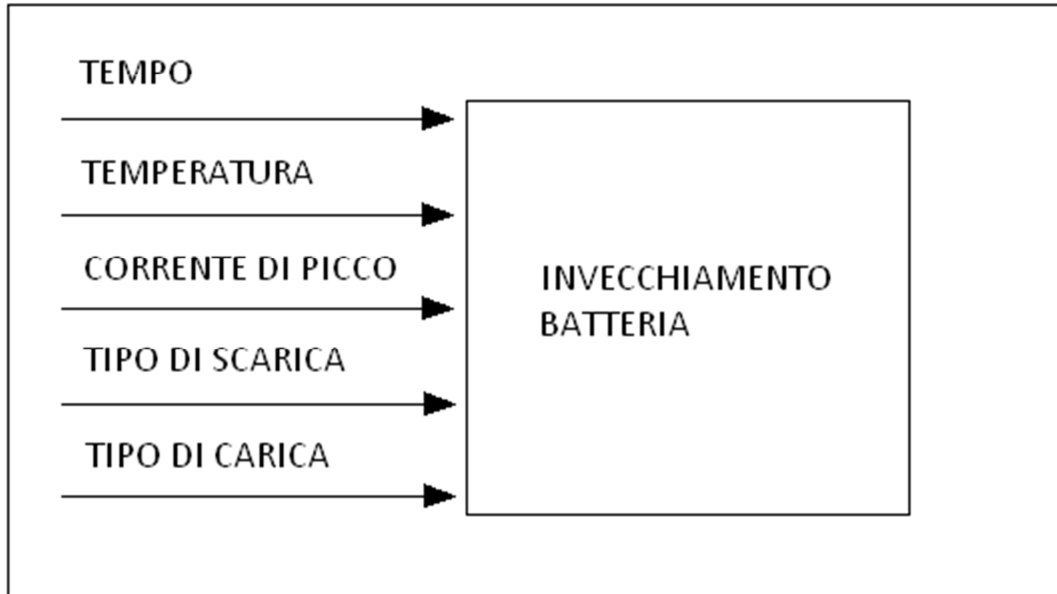


Fig. 1.15 – Agenti che provocano l'invecchiamento della batteria

In funzione del valore di questi agenti l'invecchiamento della batteria può essere più o meno marcato. Poter graficare l'andamento della capacità della batteria in funzione di queste variabili non è affatto semplice. Si preferisce mettere in relazione la capacità utile della batteria in funzione del numero di cicli di lavoro, mantenendo le altre grandezze fissate ad un certo valore, Fig. 1.16.

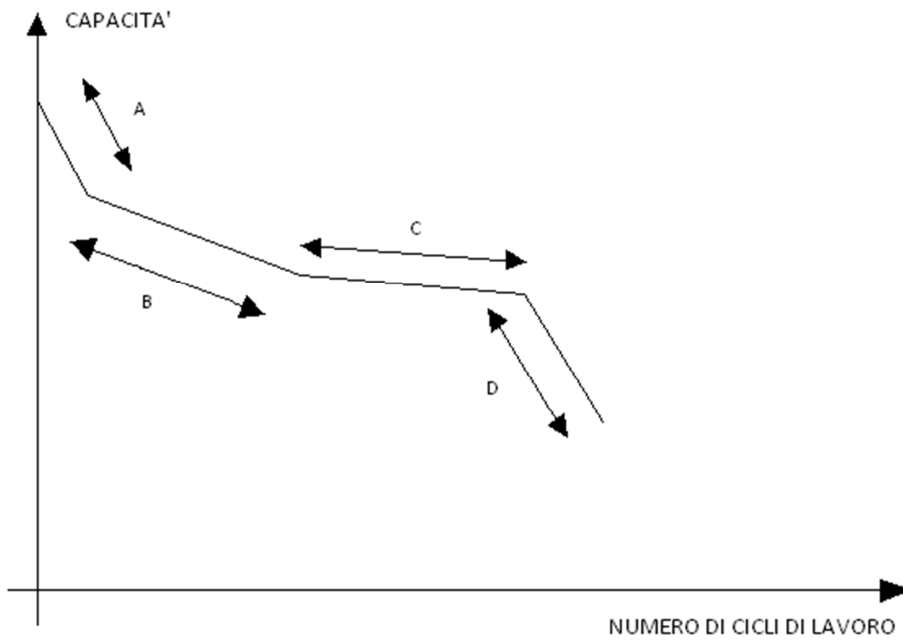


Fig. 1.16 – Andamento della capacità in funzione del numero di cicli di lavoro per una generica batteria

Da questa rappresentazione generale si può capire l'andamento di ogni fase e poi confrontarlo con una caratteristica reale di una batteria al Litio. Come si può notare l'andamento della capacità in funzione del numero di cicli si può dividere in 4 fasi principali.

#### FASE A

Vi è una rapida diminuzione della capacità e questa avviene perché vi è una perdita elevata di ioni litio a causa della formazione del SEI, qui avviene una reazione secondaria la cui velocità di reazione diminuisce all'aumentare del numero di cicli, facendo perdere della capacità utile.

#### FASE B

Vi è la formazione di una pellicola sull'anodo che riduce il materiale attivo libero, e quindi meno Ioni Litio sono intercalati nell'anodo durante la carica. Di conseguenza il tasso di perdita di Ioni Litio è minore e quindi la perdita di capacità in funzione del numero di cicli di vita si riduce.



## FASE C

Sul catodo si forma una pellicola protettiva chiamata SPI (Solid Permeable Interfase), la quale per lo stesso motivo della FASE B, riduce il materiale attivo libero e quindi anche in questa fase la perdita di capacità utile in funzione del numero di cicli si riduce.

## FASE D

Il materiale attivo libero continua a diminuire, tanto da far diminuire troppo gli ioni litio utili e questo fa perdere sempre più capacità utile alla batteria, fino al raggiungimento dell' 80 % della capacità nominale. Una volta raggiunto questo limite la batteria viene considerata obsoleta e quindi si procederà con la sostituzione.

Il raggiungimento dell'80% della capacità nominale, avviene con un certo numero di cicli che dipendono da tutte le variabili dette in precedenza. Si vuole ora confrontare la curva teorica e generica di Fig. 1.16 con una curva specifica di una batteria al Litio, Fig. 1.17. La batteria che si vuole confrontare è una  $\text{LiFePO}_4$ , HP-LX-300AH della casa costruttrice Hipower, [25]. Come si nota dal confronto, la curva reale di invecchiamento della batteria è molto più lineare e non si notano le zone descritte precedentemente.

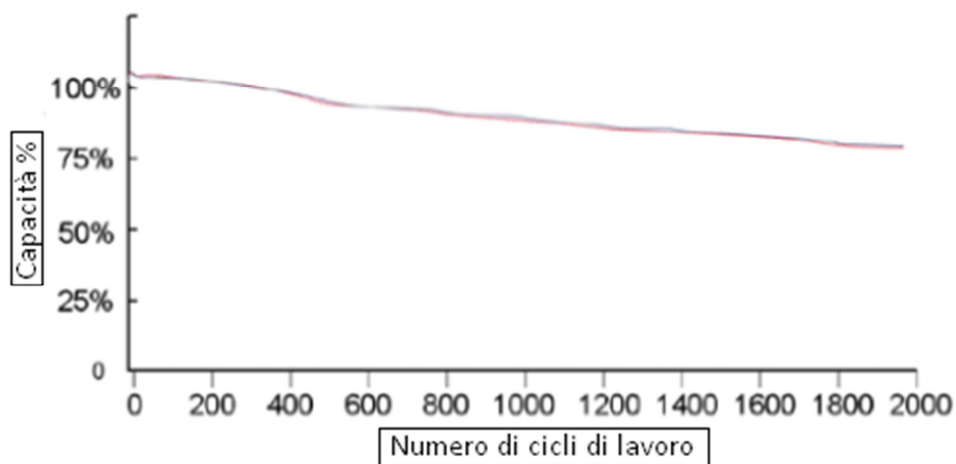


Fig. 1.17 – Andamento capacità in funzione del numero di cicli di lavoro per una batteria  $\text{LiFePO}_4$

Questa caratteristica però è in funzione di cicli di vita che comportano la completa carica e la completa scarica della batteria. Quindi nel caso in cui la batteria dovesse essere caricata quando non è completamente scarica, comporterebbe una perdita di capacità minore della perdita che si avrebbe nel caso in cui la batteria avesse sostenuto un ciclo di carica e scarica completo. Per questo motivo molti costruttori di batterie al Litio dichiarano il numero dei cicli di vita in funzione della profondità di scarica (DOD – Depth of Discharge), ad una certa temperatura, e con una certa corrente di scarica, per esempio:

Cella Ioni di Litio 5300 mAh, “Boston Power”, con una corrente di scarica pari a 0.5C, ad una temperatura di 23°C, con 100% DOD può durare 1000 cicli, con 90% DOD può durare 2000 cicli, con 80% DOD può durare 3000 cicli.

Un forte agente che provoca una riduzione della vita utile di una batteria è il modo di ricarica. Ricariche ultra rapide diminuiscono di molto la vita della batteria come si può notare nella Fig. 1.18-a Altre grandezze possono essere graficate in funzione del numero dei cicli di vita, come per esempio la resistenza interna della batteria, ma come si può notare in Fig. 1.18-b essa varia relativamente poco durante tutta la vita della batteria e quindi può essere considerata in prima approssimazione costante.

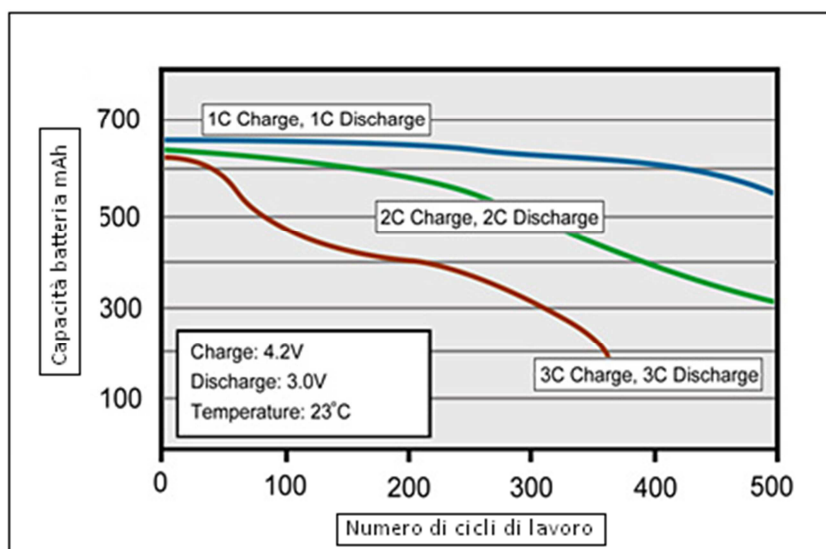


Fig. 1.18-a – Andamento capacità della batteria in funzione del numero di cicli di lavoro per diverse tipologie di carica e scarica

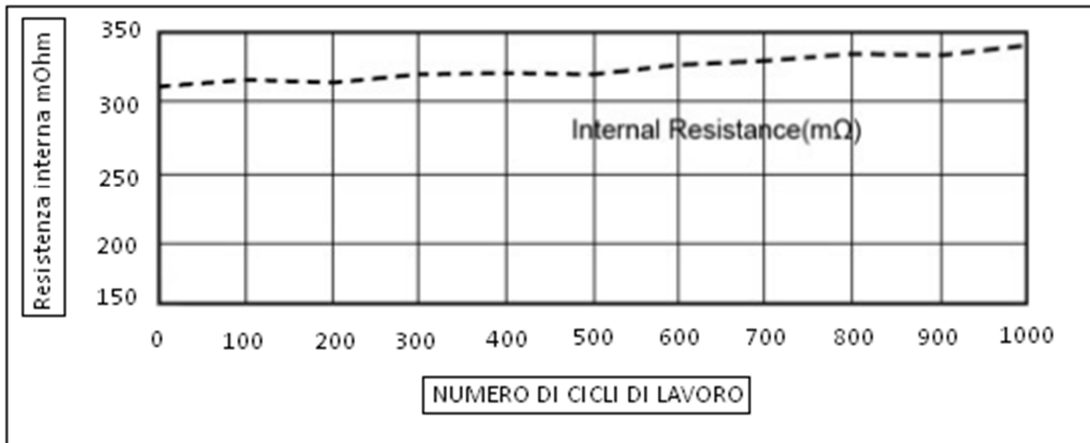


Fig. 1.18-b – Andamento della resistenza interna in funzione del numero di cicli di lavoro

## 1.6 Dimensionamento Accumulatore

### 1.6.1 Parametri caratteristici cella

Una cella, può essere vista come un bipolo in grado di assorbire o generare corrente, quindi generalmente può essere rappresentata come in Fig. 1.19 Con queste convenzioni di tensione e corrente viene visto come un bipolo generatore.

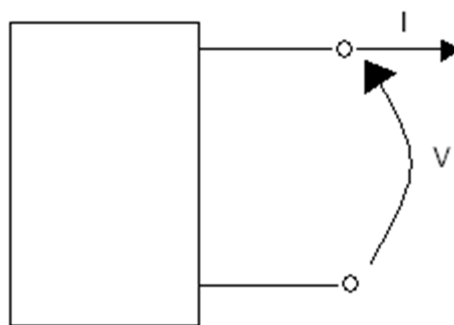


Fig. 1.19 – Rappresentazione di una batteria come un bipolo generatore

Una cella durante la carica assorbe l'energia dal circuito esterno, Fig.1.20-a mentre durante la scarica cede energia al circuito esterno, Fig. 1.20-b.

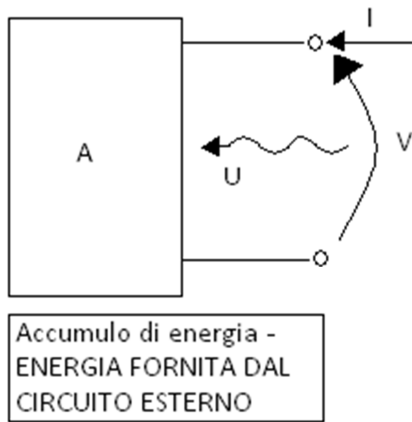


Fig. 1.20-a – Bipolo che assorbe energia

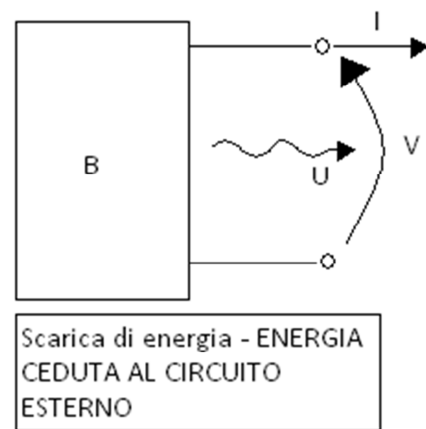


Fig. 1.20-b – Bipolo che cede energia

I terminali di una cella sono per definizione distinti in:

- ANODO – L'elettrodo che assorbe corrente;
- CATODO – L'elettrodo che eroga corrente.

Supponiamo il terminale superiore della Fig. 1.20, l'elettrodo positivo, e di conseguenza quello inferiore l'elettrodo negativo. Durante la carica e la scarica della cella il verso della corrente si inverte e di conseguenza:

- L'elettrodo positivo sarà:
  - Catodico in scarica
  - Anodico in carica
- L'elettrodo negativo sarà:
  - Catodico in carica
  - Anodico in scarica

Si vuole passare ora nella definizione dei parametri caratteristici di una cella. Si assume come convenzione, per tutta la trattazione, quella del bipolo utilizzatore quindi rappresentato in Fig. 1.20-a. I dati di targa di una cella sono:

- $C_n$  [Ah]= Capacità nominale, cioè la massima capacità accumulabile;

- $V_n$  [V]= Tensione nominale;
- $P$  [kg]= Peso cella;
- $Vol$  [l]= Volume della cella espresso in Litri;
- $E_n$  [Wh]= Energia nominale, espressa con la seguente formula:

$$E [Wh] = V_n[V] \times C_n[Ah]$$

- Energia specifica, [Wh/kg];
- Densità di energia, [Wh/l];
- Impedenza nominale, [ $m\Omega$ ];
- Massima corrente di scarica continua, [A];
- Massima corrente di carica continua, [A];
- Impulso di corrente ad un certa temperatura [ $^{\circ}C$ ] e per un certo tempo [s], [A];
- Tensione di cut-in, cioè quella tensione che si ottiene ai capi della batteria quando è completamente scarica, [V];
- Tensione di cut-off, massima tensione applicabile durante la carica, [V];
- Intervallo delle temperature di lavoro durante la carica e durante la scarica, [ $^{\circ}C$ ];
- Intervallo di temperature di riposo, [ $^{\circ}C$ ];
- Cicli di vita in funzione dello stato di scarica della batteria;
- Potenza di picco disponibile, per un certo tempo [s], [W/kg].

Da questi dati disponibili si possono ricavare altri indicatori che sono in grado di definire il funzionamento della cella in qualunque istante di tempo:

- CARICA ASSORBITA

$$C_A = \int_0^T i(t) dt$$

- ENERGIA ASSORBITA

$$E_A = \int_0^T [v(t) \times i(t)] dt$$

- SOC – STATO DI CARICA

$$SOC = \frac{C_A}{C_n}$$

Lo stato di carica, detto SOC, dalla terminologia anglosassone State of Charge, è un indicatore utile che definisce il livello di carica di una batteria. Un indicatore duale è il SOD, stato di scarica, dall'inglese state of discharge. Usualmente lo stato di carica viene espresso in percentuale SOC %. La formula indicata, intrinsecamente suppone che lo stato di carica iniziale sia nullo, ma nella realtà può facilmente accadere che una batteria venga ricaricata anche se non è completamente scarica. Per esprimere questo fatto la formula del SOC diventa:

$$SOC = SOC(0) + \frac{C_A}{C_n}$$

- RENDIMENTO DI CARICA

$$\eta_Q = \frac{Q_{SCARICA}}{Q_{CARICA}} = \frac{\int_0^{T_2} i_{SCARICA}(t) dt}{\int_0^{T_1} i_{CARICA}(t) dt}$$

Il rendimento di carica, esprime il fatto che non tutta la carica introdotta durante la fase di carica, può essere estratta durante la scarica.

- RENDIMENTO ENERGETICO

$$\eta_E = \frac{E_{SCARICA}}{E_{CARICA}} = \frac{\int_0^{T_2} i_{SCARICA}(t) u_{SCARICA}(t) dt}{\int_0^{T_1} i_{CARICA}(t) u_{CARICA}(t) dt}$$

Come si può aver notato, fino ad ora si è parlato di cella, e non si è voluto usare in termine batteria, perché quest'ultimo può essere composto da più celle, disposte in un certo modo. Di questo aspetto si parlerà molto più nel dettaglio nel paragrafo successivo.

### 1.6.2 Assemblaggio batteria

Nei veicoli elettrici, le batterie che vengono impiegate, devono avere valori di corrente e di tensioni adeguate. Per capire al meglio questa definizione appena data si ritiene utile fare un esempio. Per dimensionare un accumulo da adottare su un veicolo elettrico, si deve pensare all'autonomia che si vuole avere per un'autovettura. Ipotizzando un consumo medio di 100 [Wh/ton\*km], con un'autonomia di almeno 150 km, per un veicolo che pesa 1000 kg, vi è bisogno di un sistema di accumulo con un'energia pari a 15kWh.

$$E[Wh] = \frac{100}{1000} \left[ \frac{Wh}{kgkm} \right] \times 1000[kg] \times 150[km]$$

Per ottenere un livello di energia così elevato bisogna avere più celle connesse in serie ed in parallelo, perché una cella di solito ha tensione ai suoi capi da 2 a 5 V. Supponendo di avere una cella con una tensione nominale pari a 3,65 V ed una capacità di 10000 mAh<sup>17</sup>, per ottenere una energia di 15kWh, bisognerebbe connettere 411 celle, in quanto:

$$n^{\circ} \text{ celle} = \frac{15000 [Wh]}{3,65 [V] \times 10 [Ah]} = 410,9$$

Queste celle possono essere connesse in serie ed in parallelo; se si procedesse con la connessione di tutte le celle in serie, si raggiungerebbe una tensione ai capi della batteria pari a 1500 V (moltiplicando il valore di tensione ai capi della cella per il numero di celle in parallelo). Un valore di tensione così elevato della batteria porterebbe a scegliere un convertitore AC/DC che alimenta la cella, con un livello di tensione troppo alto. In più porterebbe anche a dover dimensionare l'isolamento per un tensione maggiore, aumentando vertiginosamente i costi. La connessione delle celle in parallelo, provoca invece l'aumento della corrente. Per questo motivo si decide di connettere un certo numero di celle in serie, così da raggiungere una tensione accettabile (per esempio circa 300 V), ed un altrettanto numero di celle in parallelo, così da raggiungere la capacità

<sup>17</sup> Bestgo Power LiFePO<sub>4</sub> – BP-HKS.

richiesta senza dover aumentare la tensione. In riferimento all'esempio proposto, fissando un valore di tensione massimo di 300 V si ottengono:

$$n^{\circ} \text{ celle serie} = \frac{300 [V]}{3,65 [V]} \cong 83$$

Successivamente dato questo valore si calcolano il numero di stringhe in parallelo:

$$n^{\circ} \text{ stringhe parallelo} = \frac{15000 [Wh]}{(3,65 [V] \times 83) \times 10 [Ah]} \cong 5$$

Grazie a questi valori si può assemblare la batteria, formando quindi 5 stringhe, ognuna con 83 celle in serie, come mostrato in Fig. 1.21.

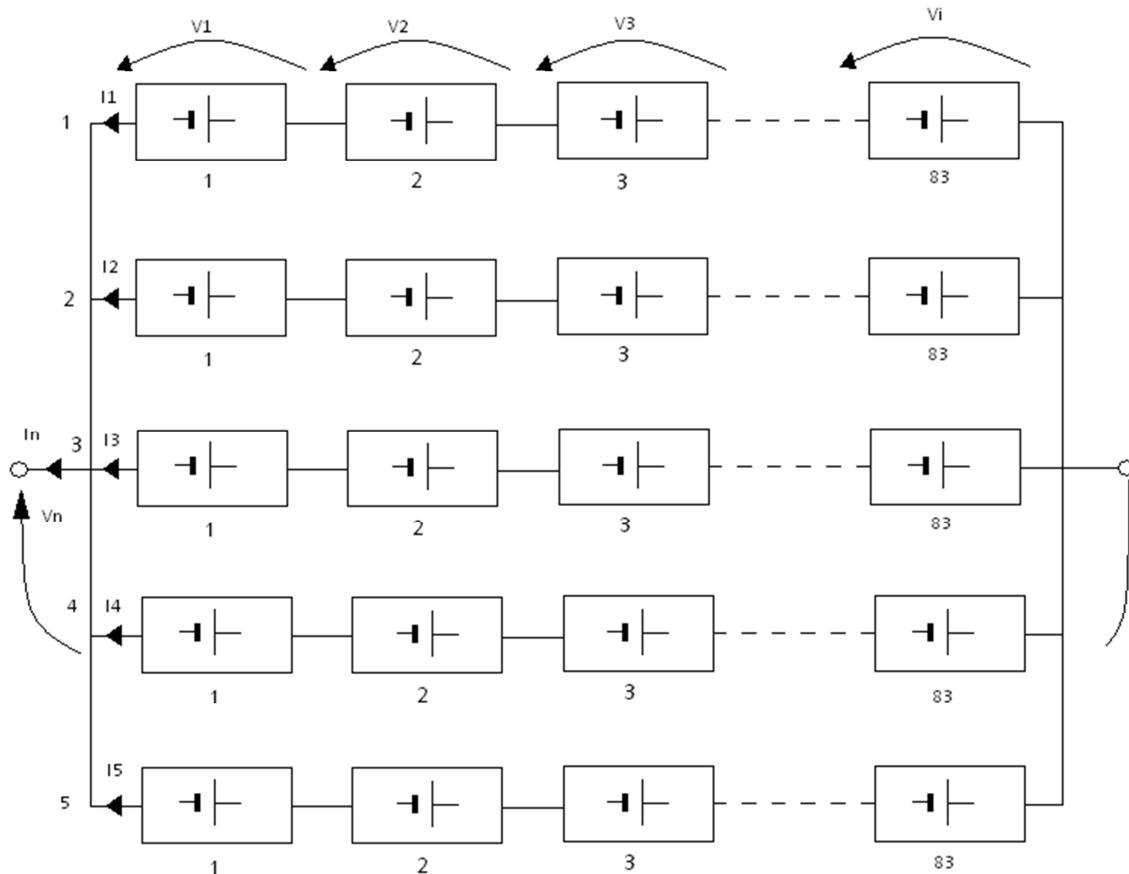


Fig. 1.21 – Batteria vista come l'insieme di celle connesse in serie ed in parallelo



Con questo metodo si conosce la tensione nominale della batteria e la corrente nominale della batteria. Quest'ultima si esprime, come detto in precedenza, tramite la capacità nominale ( $I_n=1C$ , quindi uguale a  $C_n$ ). Come si nota nelle due seguenti espressioni:

$$V_n = \sum_{i=0}^{83} V_i$$
$$I_n = \sum_{i=1}^5 I_i$$

Questo esempio è servito per capire il numero di celle da connettere per dimensionare correttamente una batteria per un veicolo elettrico. Successivamente si vuole solo dare un'idea del valore delle altre grandezze messe in gioco, [21]. Per far ciò ci si attiene ai criteri stabiliti dal consorzio statunitense USABC<sup>18</sup>. Questo consorzio ha stabilito gli obiettivi che si vogliono, raggiungere nel medio e lungo termine, per le batterie da impiegare nei veicoli elettrici, come mostrato nella seguente tabella, Fig. 1.22.

---

<sup>18</sup> USABC, US Advanced Battery Consortium – Formato nel 1991 dalle principali case automobilistiche statunitensi (GM, Ford, Chrysler), insieme a diverse compagnie tra cui il DOE (Department of Energy).

PARAMETRO	OBBIETTIVI A MEDIO TERMINE	OBBIETTIVI A LUNGO TERMINE
Densità di potenza [W/l]	460	600
Picco di potenza specifica di scarica (80% DOD, 30 s) [W/kg]	300	400
Picco di potenza specifica di carica (80% DOD, 30 s) [W/kg]	150	200
Densità di energia (tasso di scarica C/3) [Wh/l]	230	300
Energia specifica (tasso di scarica C/3) [Wh/kg]	150	200
Rapporto tra potenza specifica ed energia specifica	2:1	2:1
Tempo di vita [anni]	10	10
Cicli di vita [numero]	1000	1000
Diminuzione della capacità a fine vita [%]	20	20
Costo specifico (con una produzione di 25000 unità l'anno da 40 kWh) [\$/kWh]	150	100
Temperatura di lavoro [°C]	da -40 a +50	da -40 a +85
Tempo di ricarica nominale [ore]	6	da 3 a 6 ore
Tempo di ricarica rapido	<30 min fino al 70 % del SOC, con 150 W/kg	15 min fino all'80% del SOC
Percentuale energia nominale scaricabile in 1 ora in modo continuativo	75 %	75 %

Fig. 1.22 – Valori da raggiungere nel breve e nel lungo periodo

Tra tutti gli obiettivi proposti quello più critico è il costo specifico. Esso incide sulla dimensione del pacco batteria, incidendo di conseguenza sulla potenza e sull'energia accumulabile diminuendo quindi l'autonomia del veicolo. Di seguito vi sono indicati alcuni costi di celle agli Ioni Litio, di diversi costruttori. Si è voluta indicare questa serie di valori così da notare la differenza tra l'obiettivo posto ed i risultati attuali, [26]. I numerosi valori si riferiscono alle tecnologie agli Ioni di Litio Ferro Fosfato ed agli Ioni di litio Cobalto, che sono le tecnologie ed oggi più sviluppate. Per poter confrontare il valore

dell'obiettivo a breve termine ed il valore attuale sul mercato, si è deciso di fare una media dei valori trovati per ogni tecnologia considerata; come mostrato nella seguente tabella, Fig. 1.23.

Caratteristiche cella			Costo al kWh	Composizione cella
V	Ah	\$	\$/kWh	Struttura chimica
3,7	2	7,894465	1066,82	Litio Cobalto
3,7	1,8	4,10538	616,4234	Litio Cobalto
3,6	200	667,4857	927,0635	Litio Cobalto
3,6	100	333,7493	927,0814	Litio Cobalto
3,6	90	300,3641	927,0496	Litio Cobalto
3,6	50	166,8747	927,0814	Litio Cobalto
3,2	800	2049,863	800,7276	Litio Ferro Fosfato
3,2	400	819,9399	640,5781	Litio Ferro Fosfato
3,2	200	470,4404	735,0631	Litio Ferro Fosfato
3,2	200	409,97	640,5781	Litio Ferro Fosfato
3,2	160	278,7785	544,4893	Litio Ferro Fosfato
3,2	100	230,6113	720,6604	Litio Ferro Fosfato
3,2	90	156,8178	544,5061	Litio Ferro Fosfato
3,2	60	104,5452	544,5061	Litio Ferro Fosfato
3,2	50	127,086	794,2878	Litio Ferro Fosfato
3,2	40	69,70109	544,5398	Litio Ferro Fosfato
3,2	3,2	11,78683	1151,058	Litio Ferro Fosfato
3,2	3	10,23763	1066,42	Litio Ferro Fosfato
<b>Costo medio Litio Cobalto [\$/kWh]</b>				<b>898,5865</b>
<b>Costo medio Litio Ferro Fosfato [\$/kWh]</b>				<b>727,2845</b>

Fig. 1.23 – Costi attuali di batterie al Litio Cobalto ed al Litio Ferro Fosfato

Dal valore del costo medio si dimostra quello detto in precedenza e cioè che tra gli obiettivi anche di breve periodo, per le batterie al Litio, il raggiungimento dei costi prefissati non è stato ancora ottenuto.

## 1.7 Gestione accumulatore

### 1.7.1 Introduzione alla gestione della batteria

Come visto nel paragrafo precedente una batteria è formata da un insieme di celle connesse in serie e/o in parallelo. Quindi teoricamente si dovrebbe effettuare un controllo sui parametri fondamentali di ogni cella, quindi tensioni, correnti, e temperature, durante le fasi di scarica e carica. Quando uno di questi parametri raggiunge un valore fuori dai limiti consentiti, deve agire un sistema di controllo, che comunica alle protezioni di intervenire e interrompere la carica e/o la scarica. La corretta gestione della batteria, e quindi dell'insieme di celle che la compongono, porta ad allungarne la vita, perché altrimenti se non trattate nel modo adatto, la loro capacità di accumulare energia e la durata si possono ridurre notevolmente richiedendone una prematura sostituzione. I fattori di rischio delle batterie, come detto in precedenza, sono il sovraccarico e la scarica troppo profonda. Il sovraccarico può portare alla distruzione dell'accumulatore, mentre la profonda scarica può danneggiare irreparabilmente la batteria, diminuendone la massima capacità accumulabile. Per ridurre questi problemi, è opportuno avere un corretto controllo dello stato di carica, di ogni cella costituente la batteria. Si è parlato di tutte le celle perché, se si creassero degli squilibri di prestazioni tra una cella e l'altra, si porterebbe ad un ulteriore deterioramento delle prestazioni dell'intera batteria. Per risolvere questo ulteriore problema bisogna predisporre la batteria di un sistema di equalizzazione dello stato di carica. Nei veicoli elettrici però, vi sono presenti un elevato numero di celle, come si è potuto constatare nel paragrafo precedente, e quindi è impensabile poter controllare ogni singola cella. Un buon compromesso per sviare comunque a questi problemi è controllare piccoli gruppi di elementi, detti moduli.

### 1.7.2 Effetti prodotti dalla tensione, dalla corrente e dalla temperatura

È importantissimo rispettare i limiti di tensione massima e minima applicabile alla batteria. Nel caso si superasse il valore di tensione massima durante la carica, si genererebbe un accumulo di CO e CO<sub>2</sub>, e la formazione di sottoprodotti polimerici che si depositerebbero sul materiale attivo del catodo. Questi sottoprodotti riducono le prestazioni e la vita dell'accumulatore perché inquinano la superficie del catodo inibendo

il materiale attivo. In più provocano problemi legati alla sicurezza perché il solvente dell'elettrolita è infiammabile e può portare all'esplosione della batteria. D'altro canto, anche la scarica troppo profonda, al di sotto del valore minimo di tensione, provoca problemi. A basse tensioni, la corrente del collettore può dissolvere il rame dell'elettrolita, formando delle placche sulle particelle dell'anodo di grafite, le quali possono impedire l'utilizzo dei materiali attivi riducendo così le prestazioni e la vita delle celle. In più il continuo ripresentarsi di valori di tensioni così basse possono provocare la formazioni di dendriti, che come detto nei paragrafi precedenti, possono provocare corto circuiti. Le tecniche di controllo devono quindi impedire il funzionamento ad alti ed a bassi potenziali. Un modo per allungare la vita utile delle batterie è non mantenere la piena carica (SOC =100%) ma caricare la batteria per esempio fino al 95% riducendo quindi il valore di tensione applicata e diminuendo la decomposizione della batteria. Dualmente bisogna rispettare i limiti in corrente, soprattutto cercare di non applicare correnti troppo elevate. Infatti applicare correnti eccessive può portare alla mal diffusione del litio, che provoca la formazione di placche sulla superficie dell'elettrodo. Queste placche, come detto precedentemente, formano dendriti, che possono forare i separatori e formare corto circuiti. Dapprima i corto circuiti sono di debole intensità, causando solamente limitate scariche della cella, che possono provocare buchi di tensione, e picchi di corrente. Con il passare del tempo e quindi con l'aumento del numero di corto circuiti deboli, si perde irreparabilmente la capacità di accumulo della batteria. In più la placatura del litio metallico reagisce con l'elettrolita formando una decomposizione dell'elettrolita, vicino all'anodo, portando all'aumento della resistenza interna, diminuendo le prestazioni dell'accumulatore. Infine vi è il problema del funzionamento a elevate temperature, ma questo argomento è stato trattato ampiamente dei paragrafi precedenti.

### 1.7.3 Bilanciamento batteria

Una volta descritto il comportamento della batteria in condizioni anomale, ci si vuole addentrare nell'importante e fondamentale aspetto della gestione della batteria, il bilanciamento delle celle. Non tutte le celle, che compongono una batteria, sono perfettamente uguali, ma a causa delle tolleranze di produzione, sono diverse tra loro. In

più per batterie con un numero di celle elevate, quindi con grandi volumi, può essere che la distribuzione di temperatura non è uniforme. Questo porta ad un diverso invecchiamento, ad una variazione di impedenza interna e quindi ad un disomogeneo comportamento delle celle durante la carica e la scarica. Se si considera il processo di carica della batteria, se una cella è più degradata delle altre significa che ha una capacità di accumulo minore e quindi essa finisce prima la carica, rimanendo sovraccaricata per tutto il tempo necessario a terminare la carica delle altre celle non degradate, superando quindi la tensione massima. A causa di questo fatto vi si registra un aumento della temperatura e di pressione sulla cella degradata e quindi un ulteriore danneggiamento della cella. Dualmente, durante la scarica, la cella più degradata raggiungerà prima il valore di tensione minimo ai suoi capi, completando prima la scarica. Dal quel momento in poi rimarrà in fase di scarica fino quando tutte le celle non avranno raggiunto la fine scarica. Quindi la cella degradata sarà sottoposta ad una profondità di scarica maggiore, andando in contro a tutte le problematiche che si hanno quando la tensione scende sotto il suo valore minimo. Quindi per concludere, una cella con capacità ridotta, con resistenza interna maggiore, tende ad avere una variazione di tensione maggiore rispetto alle altre durante le fasi di carica e scarica, quindi può essere soggetta a guasti per sovratensioni. Il controllo che deve essere fatto è un controllo dinamico dello stato di carica, e quindi deve impedire alle celle degradate di essere sovraccaricate durante la carica e la scarica. È importantissimo preservare anche una singola cella, perché nel caso anche solo una di esse si guastasse bisognerebbe procedere con la sostituzione dell'intera batteria. Questo perché, se si sostituisse la sola cella danneggiata, la batteria sarebbe squilibrata perché la nuova cella sarà sicuramente più prestante rispetto alle altre. Oltre a controllare le variabili tensione e corrente, occorre anche adottare degli accorgimenti che permettano di preservarne l'equilibrio. Come prima cosa bisognerebbe scegliere le celle con le caratteristiche più simili tra loro e successivamente si dovrebbe disporre la batteria in un luogo con temperatura più uniforme possibile. La disposizione del pacco batteria su di un veicolo elettrico è un aspetto delicato, perché si vorrebbe sia equilibrarne il peso, ma d'altro canto anche avere una temperatura uniforme. I due aspetti non possono convivere tra di loro, perché la temperatura del vano motore, del bagagliaio e dell'abitacolo sono molto diverse tra di loro e quindi l'uniforme posizione della batteria

porterebbe ad una disuniforme temperatura. Viceversa una configurazione concentrata del pacco batterie porterebbe ad uno squilibrio di peso. Inoltre la concentrazione del pacco batteria non comporta una temperatura perfettamente uniforme, perché le batterie esterne avranno una capacità di raffreddamento maggiore di quelle interne. Quindi ci vorrebbe un sistema di raffreddamento che mantenga la temperatura uniforme su tutto il pacco batteria. Quindi ricapitolando, per avere un corretto utilizzo del pacco batteria bisogna avere un corretto sistema di raffreddamento, ma soprattutto un sistema di bilanciamento della carica. Per bilanciare la carica si devono usare circuiti esterni per ridistribuire oppure dissipare la carica in eccesso. Si parla di equalizzazione di carica passiva, ed equalizzazione di carica attiva, [26]:

- **EQUALIZZAZIONE PASSIVA**, ogni cella è connessa ad un circuito esterno composto da un semplice resistore. Il principio di funzionamento è il seguente: quando una cella raggiunge lo stato di carica, dissipa l'energia in eccesso sul resistore connesso in parallelo. Logicamente il resistore non deve essere connesso fino a quando non si è raggiunta la carica completa. Come si può notare nella Fig. 1.24, ogni resistore si connette alla cella tramite un interruttore, che viene comandato da una logica di controllo che chiude l'interruttore quando la cella ha raggiunto la piena carica. Un principio di funzionamento come quello appena descritto viene detto di livellamento verso l'alto, escludendo le celle che hanno raggiunto la piena carica. Se si usasse la logica di limitare la carica alle batterie a quelle con capacità minore, lo schema di controllo si chiamerebbe a livellamento verso il basso. Uno schema circuitale di questo tipo ha i vantaggi di essere di semplice realizzazione ed è rapido nel bilanciamento. Gli svantaggi sono la presenza di resistori che devono essere in grado di dissipare potenze elevate, e la presenza di interruttori in grado di interrompere elevate correnti. Per queste problematiche le applicazioni dell'equalizzazione passiva si limitano a potenza medio - basse.

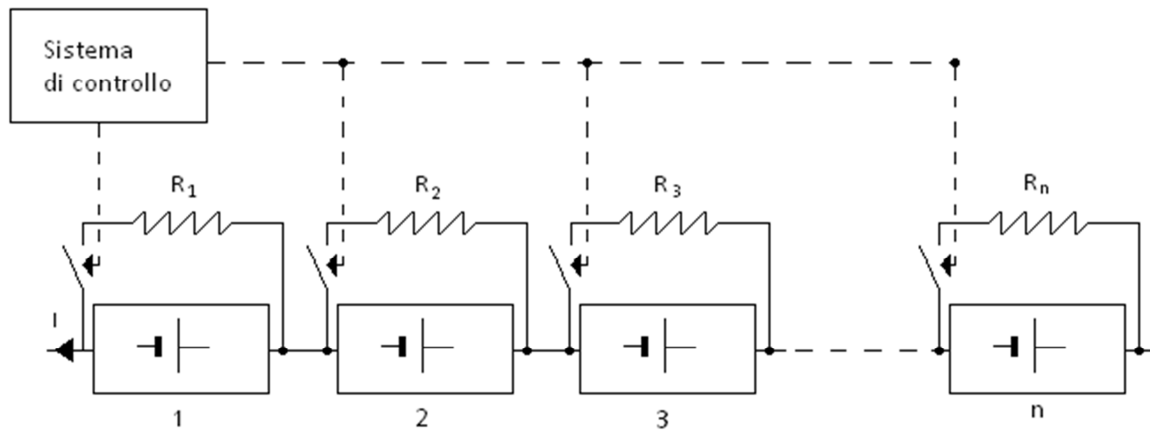


Fig. 1.24 – Equalizzazione passiva

- **EQUALIZZAZIONE ATTIVA**, essa non sfrutta il principio di sfiorare l'energia in eccesso per quella cella che ha raggiunto la carica completa, ma ridistribuisce l'energia alle altre celle che non hanno ancora completato il processo di carica. Questo permette una maggiore efficienza energetica, a discapito di un sistema di controllo più complesso. Ora si vogliono elencare le varie soluzioni circuitali, dividendole in due grandi tecniche di equalizzazione: la prima che sfrutta lo spostamento di carica, mentre la seconda utilizza convertitori di energia.

#### EQUALIZZAZIONE A SPOSTAMENTO DI CARICA – CHARGE SHUTTLING

Il charge shuttling prevede la rimozione della carica in eccesso dalla cella, immagazzinandola provvisoriamente nel condensatore, per poi procedere a scaricarla sull'elemento meno carico. Questo metodo prende il nome flying capacitor e lo schema circuitale è rappresentato in Fig. 1.25. Il sistema di controllo rileva la cella con tensione maggiore rispetto alle altre tensioni delle celle, si posiziona in parallelo ad essa, e procede con il trasferimento di carica. Successivamente procede a distribuire la carica uniformemente su tutte le altre celle. Fino a che le celle hanno la stessa tensione, il condensatore rimane nella posizione 1a e 1b, quindi scollegato. Successivamente, supponiamo che la cella 1 abbia una tensione maggiore delle altre, in quel caso il controllo chiuderà gli interruttori  $D_1$  e  $D_2$  e commuterà  $D_{c1}$  e  $D_{c2}$  rispettivamente sulle posizioni 2<sub>a</sub> e 3<sub>b</sub>. A questo punto la cella 1 cederà carica fino a che ha tensione ai suoi capi sarà maggiore di quella del condensatore. Successivamente l'interruttore  $D_1$  si aprirà ed i



due interruttori  $D_{c1}$ ,  $D_{c2}$  commuteranno nelle posizioni  $3_a$ ,  $2_b$ , e il condensatore si posizionerà sequenzialmente in parallelo a tutte le altre celle comandando i rispettivi interruttori posizionati ai lati di ogni cella, cedendo la carica accumulata. Questo è una delle tante soluzioni circuitali, che utilizzano la tecnica di equalizzazione attiva a spostamento di carica di tipo flying capacitor. Le altre versioni presenti cercano di rendere il processo di redistribuzione di carica il più veloce possibile senza appesantire troppo la logica di controllo. In più si cerca di migliorare la struttura fisica rendendola più compatta possibile. Concludendo la descrizione della tecnica di equalizzazione attiva a spostamento di carica si possono definire i vantaggi e gli svantaggi: i vantaggi consistono nell'utilizzazione di un'elettronica di controllo molto semplice che deve essere in grado solamente di commutare gli interruttori a passi prefissati fino alla completa carica; gli svantaggi invece si hanno quando le celle hanno un'efficienza non molto diversa le une dalle altre e quindi l'equalizzazione attiva risulta sfavorevole perché non efficiente rispetto a quella passiva. Un ultimo svantaggio è dovuto all'ingombro creato dai condensatori.

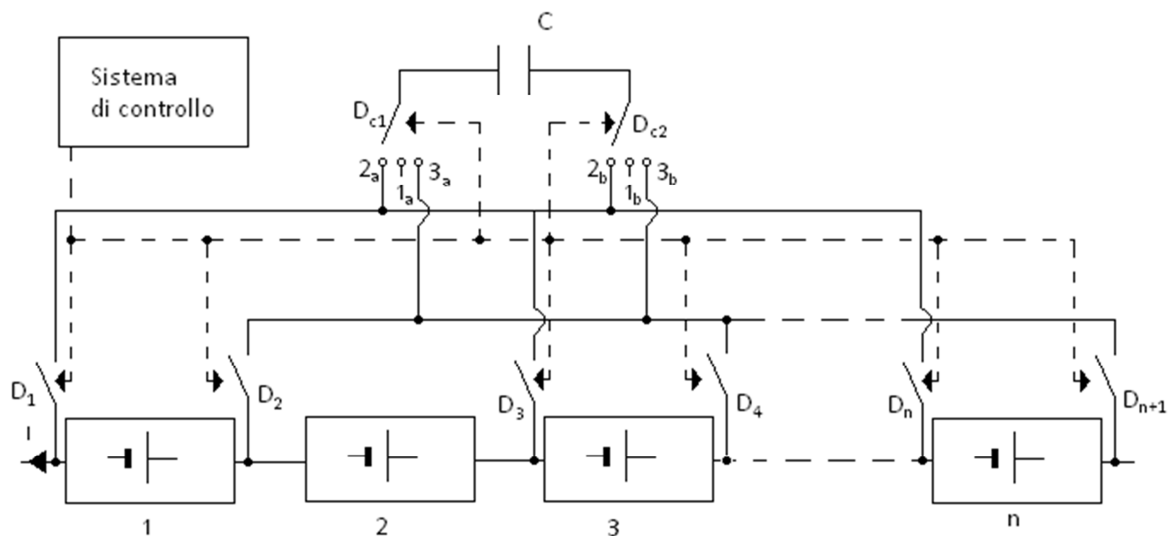


Fig. 1.25 – Equalizzazione attiva a spostamento di carica

#### EQUALIZZAZIONE A CONVERTITORI DI ENERGIA

La differenza sostanziale tra l'equalizzazione a spostamento di carica e l'equalizzazione a convertitori di energia è che quest'ultima modalità prevede che la corrente non fluisca più nel pacco batteria, ma venga, tramite un transistor, deviata su di un trasformatore;

successivamente la corrente al secondario del trasformatore viene raddrizzata dal diodo ed indirizzata sulla cella con tensione minore. Questo è il funzionamento base dell'equalizzazione a convertitori di energia, mentre la tecnica di indirizzamento della corrente sulla batteria con tensione minore può essere eseguita con la commutazione di interruttori (switched trasformer), Fig. 1.26, oppure direttamente tramite il secondario del trasformatore, Fig. 1.27. Oppure un'altra versione presenta un trasformatore per ogni cella, o stringa, Fig. 1.28. Utilizzare l'equalizzazione con convertitori di energia risolve il problema della piccola differenza di efficienza tra le celle, a discapito però di un aumento dei costi e di una complessità di gestione del sistema di controllo maggiore.

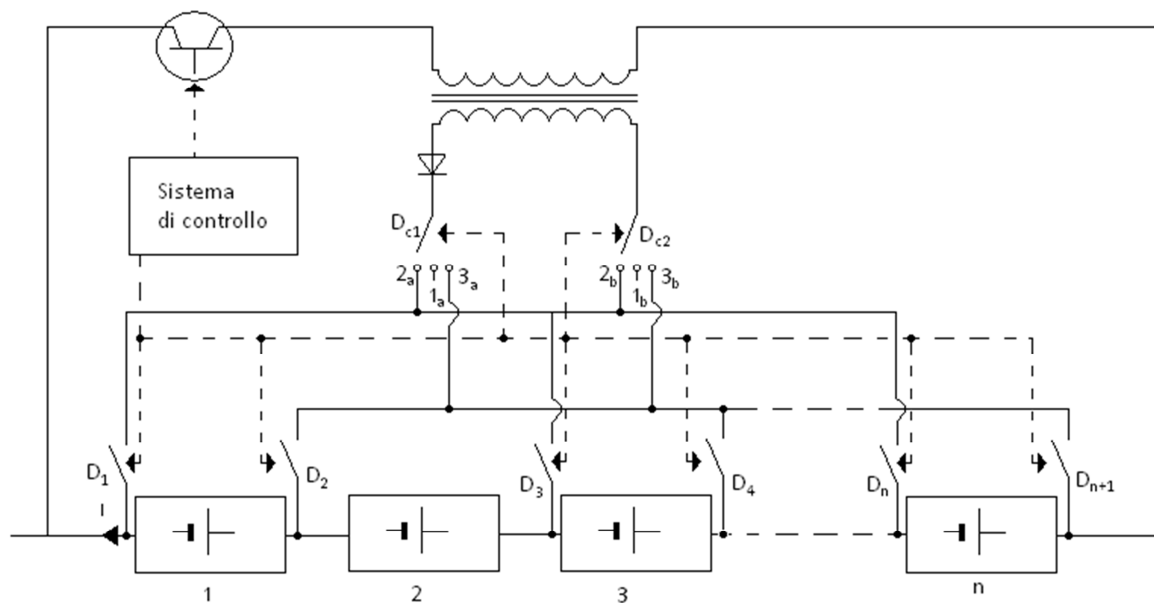


Fig. 1.26 – Equalizzazione attiva switched transformer

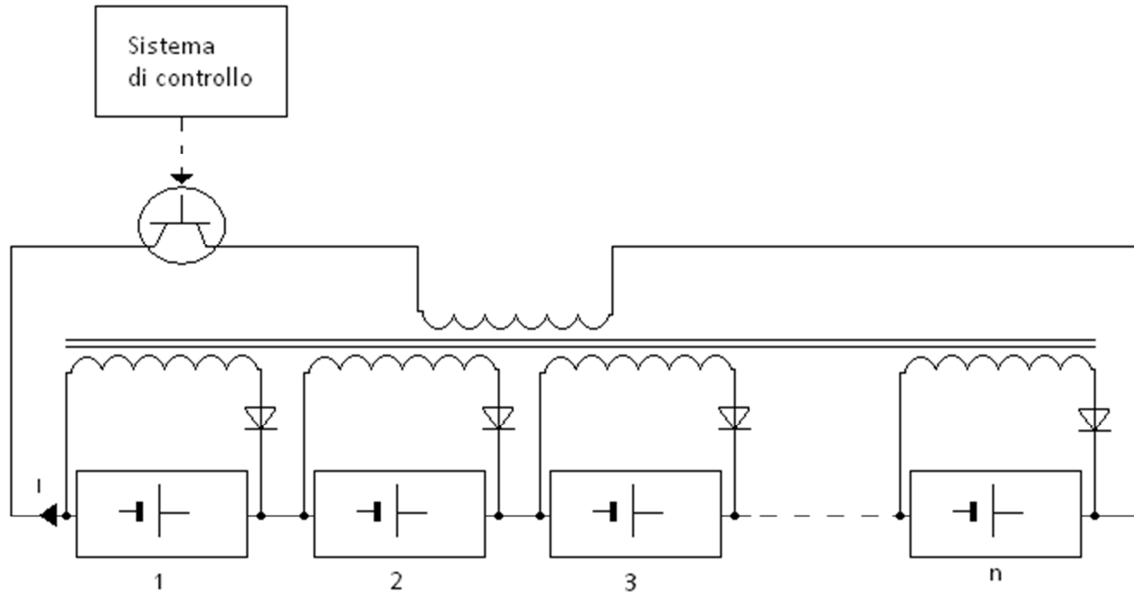


Fig. 1.27 – Equalizzazione attiva con trasformatore a secondari multipli

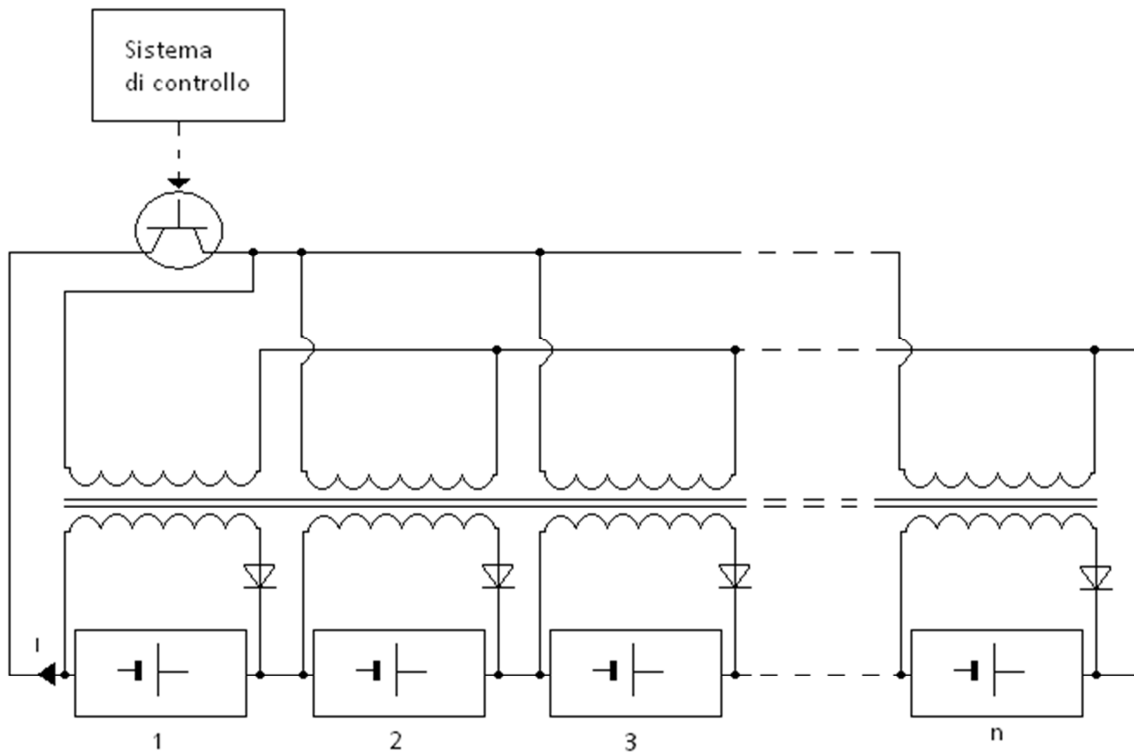


Fig. 1.28 – Equalizzazione attiva con trasformatori multipli

Una volta presentati i metodi per il bilanciamento della batteria e ricordando l'enorme importanza che deve avere un corretto funzionamento della singola cella, si riesce a capire quanto sia fondamentale dover valutare i parametri fondamentali del sistema batteria. Si deve quindi osservare istantaneamente come varia lo stato di carica, la tensione, la corrente e la temperatura delle singole celle e dell'intera batteria. Per far ciò bisogna inizialmente studiare il comportamento elettrochimico della batteria per poter creare un modello in grado di valutare come variano i parametri della cella, del modulo oppure dell'intera batteria.

## 2. Modello batteria al Litio

### 2.1 Introduzione

Lo scopo dei prossimi capitoli è poter creare un modello della batteria al Litio, in grado di simulare situazioni transitorie e di regime. Per far ciò si devono fare molti passaggi logici prima di poter presentare il modello più adeguato. Come prima cosa si devono descrivere i fenomeni elettrochimici, attraverso una formulazione matematica. Dopo aver inquadrato questi aspetti, si faranno delle semplificazioni, per arrivare a stendere una rappresentazione circuitale. La rappresentazione che verrà trovata, dovrà essere validata con una simulazione numerica. Dopo questo passaggio bisogna porci un'ultima domanda, in quali applicazioni può essere usato. Un circuito equivalente che deve essere applicato a una singola batteria può avere un determinato grado di precisione, mentre un secondo circuito equivalente che deve essere applicato per la gestione di diverse batterie al litio deve concedersi un certo numero di semplificazioni. La peculiarità di un circuito equivalente applicabile a diverse batterie al litio, è la flessibilità intrinseca che esso deve avere. Le batterie sono sistemi non lineari, quindi la loro modellizzazione non è affatto semplice, e richiede un'ampia e dettagliata conoscenza dei principi chimici che governano il loro corretto funzionamento. Vi sono vari approcci per modellizzare il funzionamento di un accumulatore. In Fig. 2.1 si vogliono indicare vari metodi per modellizzare il comportamento di una batteria. Come si può notare più il modello è preciso più diventa di difficile implementazione [31].

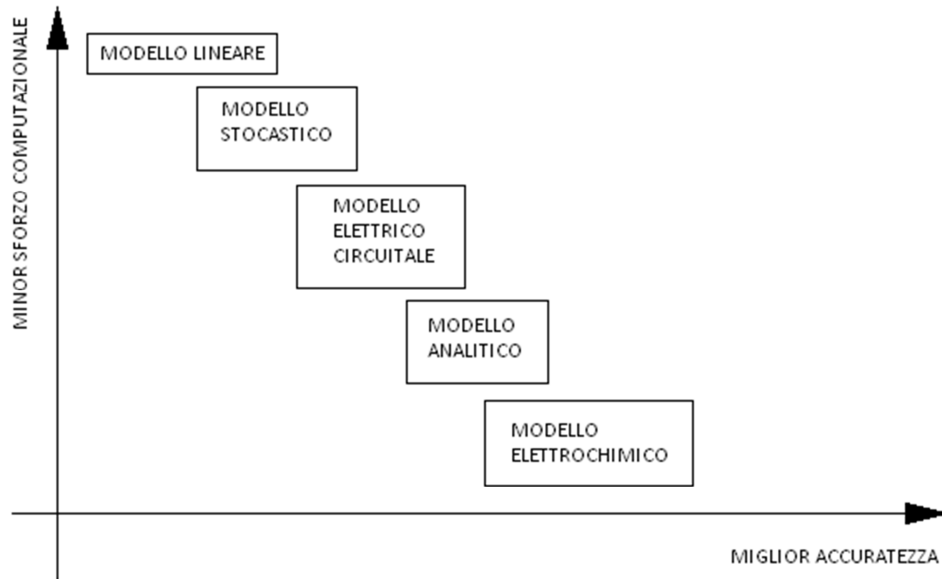


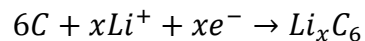
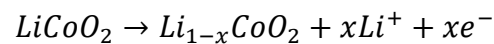
Fig. 2.1 – Accuratezza e sforzo computazionale in funzione del tipo di modello di batteria

Un modello lineare, è molto semplificato e non tiene conto nel funzionamento interno della batteria, perché effettua soltanto un bilancio energetico, l'energia fornita meno l'energia utilizzata. Grazie al suo piccolo sforzo computazionale, questo modello è preferito in applicazioni dove la precisione nella stima della carica non è critica, in quanto non tiene conto del comportamento reale della batteria. In opposizione ai modelli lineari vi sono i modelli elettrochimici che si basano su reazioni di chimiche e sulla modellizzazione dettagliata degli elettrodi e del separatore. Questi modelli sono i più precisi, ma si basano su sistemi di equazioni differenziali con decine di parametri e non sono adatte per i calcoli in real time. Per ovviare a questo problema si può far affidamento a modelli analitici, i quali perdono in accuratezza, ma hanno un minor sforzo computazionale. Si vogliono citare modelli di rete neurale i quali sono adatti a descrivere problemi matematici. Essi vengono molto utilizzati ed il loro sforzo computazionale dipende dal numero di variabili considerate. Vi sono anche modelli analitici derivati da modelli elettrochimici, i quali aumentano di precisione senza appesantire troppo gli sforzi computazionali. I modelli stocastici vengono usati quando la precisione del modello non è fondamentale, ma si vuole avere un basso sforzo computazionale. Infatti questi modelli vengono utilizzati nelle implementazioni software. Infine i modelli circuitali descrivono il

comportamento di una cella tramite un circuito elettrico equivalente. Essi soffrono di un modesto sforzo computazionale ed hanno una buona approssimazione. Questi però variano a seconda della complessità del circuito che si vuole considerare; infatti i modelli circuitali più complessi riescono a descrivere bene anche le prestazioni dinamiche di una batteria. Nel prossimo paragrafo si vogliono descrivere i fenomeni elettrochimici tramite equazioni matematiche. Questo passaggio è obbligato perché solo così si può raggiungere un'adeguata conoscenza dei fenomeni che avvengono durante la carica e la scarica della batteria, e quindi infine avere gli strumenti necessari per poter creare un circuito equivalente tramite delle adeguate e soprattutto giustificate semplificazioni.

## 2.2 Descrizione matematica dei fenomeni elettrochimici

Lo ione  $\text{Li}^+$ , portatore di carica, fluisce dal catodo all'anodo, attraversando l'elettrolita e la membrana separatrice. Riprendiamo le due reazioni chimiche che avvengono all'anodo ed al catodo, già indicate del capitolo precedente.



Per esprimere matematicamente quello che accade all'interno della batteria, bisogna modellizzare con equazioni matematiche le reazioni elettrochimiche, applicate alla struttura della batteria [29]. Quindi inizialmente, rappresentiamo la struttura fisica della batteria, Fig. 2.2. Essa, come detto nel capitolo precedente, è composta dai collettori di corrente, catodo, dalla membrana separatrice e dall'anodo. Il catodo sarà formato da tante particelle di  $\text{LiCoO}_2$  mentre l'anodo sarà formato da tante particelle di  $\text{Li}_x\text{C}_6$ . Sia nell'anodo che nel catodo le particelle saranno immerse in una soluzione elettrolita.

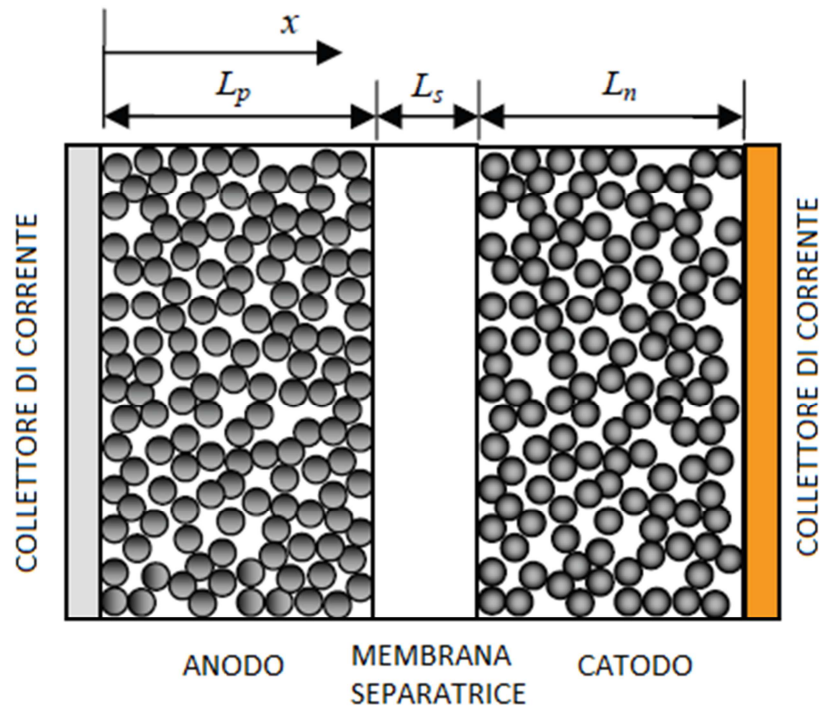


Fig. 2.2 – Struttura fisica batteria e sistema di riferimento macroscopico

Come in tutti i problemi dove si deve rappresentare una situazione fisica con equazioni matematiche, è di norma definire un sistema di riferimento. In questo problema si sceglierà un sistema di riferimento per la struttura macroscopica comprendente i due elettrodi, la membrana separatrice e l'elettrolita. Ed un secondo sistema di riferimento per la struttura microscopica, costituita dalla generica particella del materia anodico e del materiale catodico. L'origine degli assi della struttura macroscopica è l'inizio del catodo, in coordinate cartesiane, Fig. 2.2. Mentre per la struttura microscopica, ogni particella sarà rappresentata come una sfera, ed l'origine degli assi sarà il centro della sfera, in coordinate sferiche, Fig. 2.3



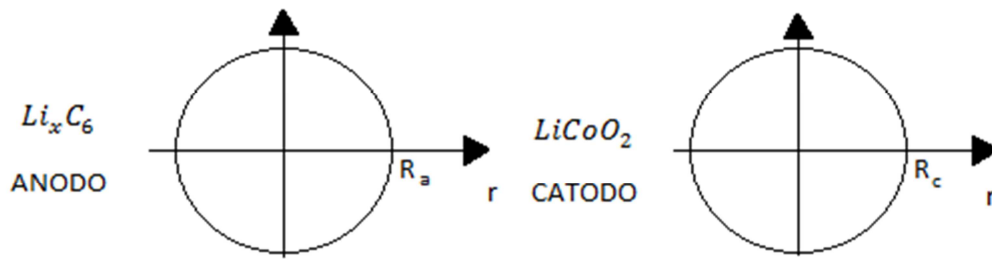


Fig. 2.3 – Sistema di riferimento microscopico della particella dell’anodo e del catodo

Durante la fase di carica e di scarica lo ione  $\text{Li}^+$  parte da un elettrodo, attraversa la membrana separatrice e raggiunge l’altro elettrodo, grazie alla presenza dell’elettrolita. Più nel dettaglio però lo ione attraverserà prima la struttura solida della propria particella, poi la struttura liquida nell’elettrolita, attraverserà la membrana separatrice, per infine raggiungere l’altro elettrodo dove, anche qui, attraverserà una fase liquida ed una solida. Il catione viaggia da un elettrodo all’altro per diffusione. Il modo per descrivere, questo diffondersi dello ione nella fase solida ed in quella liquida, può avvenire tramite le leggi di diffusione di Fick. Queste leggi sono state formulate dal medico Adolf Eugen Fick studiando il flusso di un gas attraverso una membrana [27]. Queste leggi prevedono che la quantità di gas, che in un intervallo di tempo, passa attraverso le membrane alveolari dipende da un coefficiente di diffusione, della superficie di scambio, e dalla differenza della concentrazione. L’equazione matematica, della prima legge di Fick, esprime il flusso  $\phi$ , come la differenza di concentrazione  $C$  lungo la direzione di diffusione, per il coefficiente di diffusione  $D$ , come indicato nella seguente equazione:

$$\phi = D \frac{\partial C}{\partial x}$$

Questa equazione non tiene conto della variazione di concentrazione nel tempo. Se si vuole tener conto anche di questa variazione, bisogna definire la seconda legge di Fick. Essa è un’equazione differenziale dove la variazione di concentrazione nel tempo è espressa come il coefficiente di diffusione per la derivata seconda della concentrazione lungo la direzione di diffusione. In seguito si vogliono indicare le equazioni che esprimono

la seconda equazione di Fick lungo una direzione unidimensionale, oppure lungo una direzione spaziale in coordinate cartesiane.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right)$$

Si vuole, tramite le equazioni di Fick, descrivere l'andamento del catione di Litio  $\text{Li}^+$ . Supponiamo di trovarci inizialmente nella sfera, che approssima la particella solida, nel catodo. Il catione attraverserà la sfera, per poi giungere all'elettrolita. Quando esso percorre la sfera ci troviamo nella fase solida, mentre una volta raggiunto l'elettrolita saremo della fase liquida, chiamata anche fase elettrolita. Successivamente il catione attraverserà tutto l'elettrolita per raggiungere la membrana separatrice. Successivamente passerà attraverso tutta la membrana separatrice dove sarà nuovamente nella fase elettrolita. Infine raggiungerà l'anodo dove sarà presente anche qui una fase elettrolita nell'elettrolita ed una fase solida nella particella.

#### STEP 1

Lo Ione sta percorrendo la fase solida all'interno della particella solida, approssimata da una sfera, nel catodo. In questo caso l'equazione di Fick dovrà essere espressa in coordinate sferiche, come espresso in seguito.

$$\frac{\partial C_{cs}[\text{mol}/\text{m}^3]}{\partial t[\text{s}]} = \frac{D_{cs}[\text{m}^2/\text{s}]}{r^2[\text{m}^2]} \frac{\partial}{\partial r[\text{m}]} \left( r^2[\text{m}^2] \frac{\partial C_{cs}[\text{mol}/\text{m}^3]}{\partial r[\text{m}]} \right)$$

Dove:

- $C_{cs}$  è la concentrazione di ioni litio nel catodo durante la fase solida;
- $D_{cs}$  è il coefficiente di diffusione nel catodo durante la fase solida.

Come si può notare se ci ponessimo nel centro della sfera, la derivata spaziale della concentrazione di Ioni di Litio nel catodo durante la fase solida sarà nulla. Mentre se ci ponessimo sul bordo della sfera, essa assumerà un valore diverso da zero. In quel punto quindi ci sarà un flusso di Ioni che chiameremo  $\phi_c$ , perché riferito al catodo. Questo flusso si crea perché vi è il passaggio dalla fase solida alla fase elettrolita, in corrispondenza del guscio esterno della sfera. Ciò che però si vuole ottenere da una modellizzazione matematica, sono quelle grandezze che ci permettono di studiare il comportamento dell'oggetto modellizzato. In questo caso quindi ci interessa ottenere l'andamento della grandezze elettriche. Di conseguenza dall'equazione di Fick si vuole ottenere l'andamento del potenziale. Per far ciò ci atteniamo alla legge di Ohm, come descritto in seguito:

$$\sigma_{cs}[S/m] \frac{\partial^2 V_{cs}[V]}{\partial x^2[m^2]} = F[C/mol] s_c[1/m] \phi_c[mol/m^2 s]$$

Dove:

- $\sigma_{cs}$  è la conduttività del catodo nella fase solida;
- $V_{cs}$  è il potenziale della fase solida nel catodo;
- $F$  è la costante di Faraday;
- $s_c$  è la superficie specifica del catodo<sup>19</sup>.

<sup>19</sup> Si può notare che l'unità di misura, espressa nell'equazione in cui vi è presente la superficie specifica  $s_c$ , è  $1/m$ , questo perché una superficie specifica è espressa in  $m^2/m^3$ .

STEP 2

Il catione raggiunge la fase elettrolita nel catodo. Esso percorrerà tutto l'elettrolita del catodo prima di raggiungere la membrana separatrice. È doveroso quindi modellizzare matematicamente come varia il flusso ioni nell'elettrolita del catodo. Esprimiamo l'equazione di Fick in coordinate cartesiane, come mostrato in seguito:

$$\varepsilon_c \frac{\partial C_{ce} [mol/m^3]}{\partial t [s]} = D_{ce} [m^2/s] \frac{\partial^2 C_{ce} [mol/m^3]}{\partial x^2 [m^2]} + s_c [1/m] (1 - n) \phi_c [mol/m^2 s]$$

Dove:

- $C_{ce}$  è la concentrazione di ioni litio nel catodo durante la fase elettrolita;
- $D_{ce}$  è in coefficiente di diffusione nel catodo durante la fase elettrolita;
- $\varepsilon_c$  coefficiente che modella la porosità del catodo;
- $n$  è il numero di trasferimento degli Ioni di Litio nell'elettrolita [30].

Come per lo STEP 1 è doveroso modellizzare la variazione di tensione all'interno del catodo nella fase elettrolita. Essa varia secondo la seguente relazione:

$$-\frac{\partial}{\partial x [m]} \left( \sigma_{ce} \left[ \frac{S}{m} \right] \frac{\partial V_{ce} [V]}{\partial x [m]} \right) + \frac{2RT [K] (1 - n)}{F} \frac{\partial}{\partial x [m]} \left( \sigma_{ce} \left[ \frac{S}{m} \right] \frac{\partial \ln C_{ce} [mol/m^3]}{\partial x [m]} \right) =$$

$$= F [C/mol] s_c [1/m] \phi_c [mol/m^2 s]$$

Dove:

- $\sigma_{ce}$  è la conduttività del catodo nella fase elettrolita;
- $V_{ce}$  è il potenziale del catodo nella fase elettrolita;
- $T$  è la temperatura;
- $R$  costante universale dei gas.

## STEP 3

Il catione in questo step raggiungerà la membrana separatrice e successivamente la attraverserà per raggiungere l'anodo. Nella membrana separatrice non vi sarà presente una fase solida, ma esclusivamente una fase elettrolita. Di conseguenza la seconda equazione di Fick che rappresenta la variazione di concentrazione sarà espressa esclusivamente per la fase elettrolita e sarà in coordinate cartesiane, come mostrato in seguito:

$$\varepsilon_{ms} \frac{\partial C_{mse} [mol/m^3]}{\partial t [s]} = D_{mse} [m^2/s] \frac{\partial^2 C_{mse} [mol/m^3]}{\partial x^2 [m^2]}$$

Dove:

- $C_{mse}$  è la concentrazione di ioni litio nella membrana separatrice durante la fase elettrolita;
- $D_{mse}$  è il coefficiente di diffusione nella membrana separatrice durante la fase elettrolita;
- $\varepsilon_{ms}$  coefficiente che modella la porosità della membrana separatrice.

Si può confrontare questa equazione con quella che esprime l'andamento di concentrazione nello step 2, quindi l'andamento di concentrazione degli ioni nella fase elettrolita del catodo. Si può notare che non vi è il termine dovuto al flusso di ioni, questo perché il flusso di ioni nella membrana separatrice è nullo in quanto non vi è passaggio da fase solida a fase elettrolita. Come per gli altri step bisogna modellizzare l'andamento del potenziale all'interno della membrana separatrice. Esso viene descritto tramite la seguente relazione:

$$-\frac{\partial}{\partial x [m]} \left( \sigma_{ms} \left[ \frac{S}{m} \right] \frac{\partial V_{ms} [V]}{\partial x [m]} \right) = -\frac{2RT [K] (1-n)}{F} \frac{\partial}{\partial x [m]} \left( \sigma_{ms} \left[ \frac{S}{m} \right] \frac{\partial \ln C_{ms} [mol/m^3]}{\partial x [m]} \right)$$

Dove:

- $\sigma_{ms}$  è la conduttività della membrana separatrice;
- $V_{ce}$  è il potenziale della membrana separatrice;
- $T$  è la temperatura.

Dualmente all'andamento della concentrazione, per la variazione del potenziale, non vi è presente il termine dovuto al flusso, perché come detto precedentemente, non c'è il passaggio dalla fase solida alla fase elettrolita.

#### STEP 4

In questo step lo Ione raggiunge l'anodo, e sarà sottoposto sia ad una fase solida che ad una liquida, proprio come accadeva negli step 1 e 2 nel catodo. In teoria si dovrebbe scindere questo step in due, come è stato fatto per il catodo. Ma la trattazione sarebbe completamente identica, quindi si preferisce definire tutte le equazioni in quest'unico step. Riportiamo l'andamento della concentrazione degli Ioni di litio nella seguente relazione, durante la fase solida:

$$\frac{\partial C_{as} [mol/m^3]}{\partial t} = \frac{D_{as} [m^2/s]}{r^2 [m^2]} \frac{\partial}{\partial r [m]} \left( r^2 [m^2] \frac{\partial C_{as} [mol/m^3]}{\partial r [m^2]} \right)$$

Dove:

- $C_{as}$  è la concentrazione di ioni litio nell'anodo durante la fase solida;
- $D_{as}$  è il coefficiente di diffusione nell'anodo durante la fase solida.

Come per il catodo se ci ponessimo al centro della sfera il flusso di Ioni sarà nullo, mentre se ci ponessimo sul bordo della sfera, essa assumerà un valore diverso da zero. In quel punto si creerà un flusso di Ioni che chiameremo  $\phi_a$ , perché riferito all'anodo. L'andamento del potenziale durante la fase solida varierà secondo la seguente relazione:

$$\sigma_{as}[S/m] \frac{\partial^2 V_{as}[V]}{\partial x^2[m^2]} = F[C/mol]s_a[1/m]\phi_a[mol/m^2s]$$

Dove:

- $\sigma_{as}$  è la conduttività dell'anodo nella fase solida;
- $V_{as}$  è il potenziale dell'anodo nella fase solida;
- $S_a$  è la superficie specifica dell'anodo.

Sempre nell'anodo, come detto in precedenza lo ione attraverserà una fase elettrolita, e quindi, con la seguente equazione, si vuole descrivere l'andamento della concentrazione di Ioni nella fase elettrolita dell'anodo:

$$\varepsilon_a \frac{\partial C_{ae}[mol/m^3]}{\partial t[s]} = D_{ae}[m^2/s] \frac{\partial^2 C_{ae}[mol/m^3]}{\partial x^2[m^2]} + s_a[1/m](1-n)\phi_a[mol/m^2s]$$

Dove:

- $C_{ae}$  è la concentrazione di ioni litio dell'anodo durante la fase elettrolita;
- $D_{ae}$  è il coefficiente di diffusione dell'anodo durante la fase elettrolita;
- $\varepsilon_a$  coefficiente che modella la porosità dell'anodo;

Come ultimo passaggio del quarto step, si deve rappresentare l'andamento del potenziale nella fase elettrolita, tramite la seguente equazione:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial x[m]} \left( \sigma_{ae} \left[ \frac{S}{m} \right] \frac{\partial V_{ae}[V]}{\partial x[m]} \right) + \frac{2RT[K](1-n)}{F} \frac{\partial}{\partial x[m]} \left( \sigma_{ae} \left[ \frac{S}{m} \right] \frac{\partial \ln C_{ae}[mol/m^3]}{\partial x[m]} \right) = \\ = F[C/mol]s_a[1/m]\phi_a[mol/m^2s] \end{aligned}$$

Dove:

- $\sigma_{ae}$  è la conduttività dell'anodo nella fase elettrolita;
- $V_{ae}$  è il potenziale dell'anodo nella fase elettrolita;
- $T$  è la temperatura.

Con quest'ultima equazione si può ritenere conclusa la migrazione dello Ione di Litio da un elettrodo all'altro. Come si è potuto constatare la descrizione dei fenomeni elettrochimici tramite equazioni matematiche non è affatto semplice, in quanto le equazioni che descrivono l'andamento del potenziale all'interno della batteria sono 5, in aggiunta alla corrispondenti 5 equazioni che descrivono l'andamento della concentrazione degli Ioni di Litio. Tutte queste equazioni, come si può notare, sono equazioni spaziali a tempo variate, la cui risoluzione ha come prerequisito un elevato sforzo computazionale. Quindi per concludere questo paragrafo si può con certezza affermare che una modellizzazione elettrochimica non è adatta a simulare situazioni in real time, e quindi per esempio in quelle situazioni dove la gestione dell'accumulatore istante per istante è un aspetto fondamentale, come nel battery management system, già citato nel paragrafo precedente dove si esplicitava il problema del bilanciamento di carica. Oppure, la modellizzazione elettrochimica, non è adatta in quelle situazioni dove si vogliono amministrare semplicemente le grandezze elettriche ai capi della batteria, per esempio nelle situazioni di semplice gestione dell'energia. Quindi una domanda che ci si può porre è quando sono utili queste modellizzazioni matematiche dirette dei fenomeni elettrochimici. La risposta è in quelle situazioni dove si vogliono migliorare le performance interne delle batterie, quindi in tutte le ricerche scientifiche dove l'obiettivo fondamentale non è il controllo delle variabili ai morsetti della batteria, ma il controllo di tutte quelle grandezze interne in grado di migliorare l'efficienza, e la vita degli accumulatori.



## 2.3 Creazione modello elettrico circuitale

Una volta descritte in dettaglio le reazioni elettrochimiche, averle formalizzate con equazioni matematiche, ed aver dimostrato come una modellizzazione elettrochimica possa portare ad un elevato sforzo computazionale nella gestione di così un elevato numero di equazioni che non dipendono dalla sola variabile temporale, ma sono dipendenti anche dalla posizione. Si vuole ora entrare nello studio di una batteria tramite un circuito equivalente. Come primo passo si vuole far riferimento alla Fig. 2.1, già rappresentata in alcuni paragrafi precedenti. Tramite questa figura si vuole evidenziare come un circuito elettrico equivalente possa portare a risultati che approssimano abbastanza precisamente gli andamenti reali di una batteria, a fronte di un modesto sforzo computazionale. Un approccio circuitale, oltre a ridurre lo sforzo computazionale, può dare un riscontro diretto su bilanci di tipo energetico. Questo perché, se pensassimo ad una batteria come ad un sistema termodinamico, Fig. 2.4, ci sarà un'energia che entrerà nel sistema e che provvederà ricaricare la batteria ed un'altra parte invece sarà dissipata. Tramite un circuito equivalente è semplice capire, a fronte di un energia fornita, quanta energia viene dissipata e quanta accumulata. Dualmente durante la scarica di una batteria, a fronte di un energia fornita dalla batteria, quale quota parte di essa è utilizzabile e quanta invece viene dissipata.

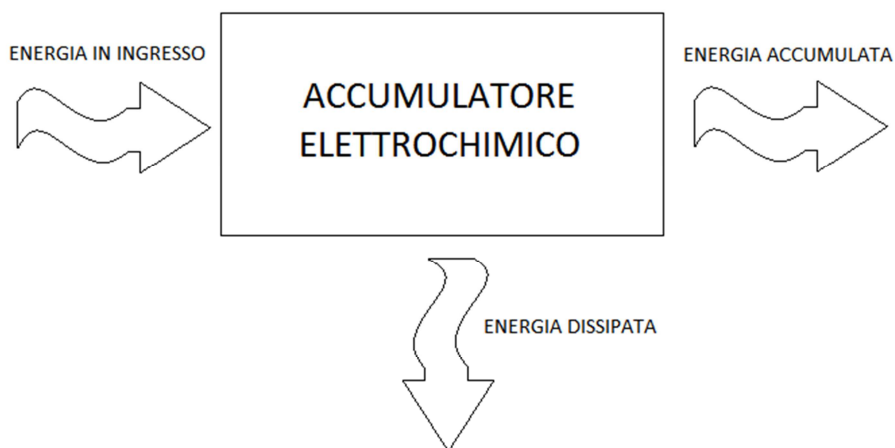


Fig. 2.4 – Batteria come sistema termodinamico

Un approccio termodinamico dà un'idea iniziale di come deve essere costituito un circuito che modella un accumulatore. Come prima cosa esso deve avere un generatore di tensione che modella l'andamento della tensione interna della batteria in funzione dello stato di carica, e quindi l'energia che la batteria deve essere in grado di fornire; successivamente dovrà essere presente una resistenza che modella le perdite per effetto Joule, e quindi quel contributo di energia che viene dissipato; infine deve possedere un elemento che deve essere in grado di modellare come varia la tensione ai capi della batteria, quando vi sono transitori, quindi una capacità.

Il primo passo da compiere è cercare di creare una funzione che lega la tensione interna della batteria con lo stato di carica. Essa non è una funzione semplice e varia in modo non lineare, come si può notare dalla Fig. 1.10. Quindi il primo componente da modellare è il generatore di tensione che modella la variazione dell'energia della batteria come una variazione della tensione. Per far ciò bisogna definire una nuova grandezza, la tensione di circuito aperto (OCV – Open Circuit Voltage). Questa tensione può essere vista come la tensione ai capi della batteria depurata da tutti i termini dissipativi. Una volta ottenuta questa grandezza bisogna trovare il legame che vi è tra essa e lo stato di carica. Una funzione che approssima discretamente l'andamento della OCV è una funzione polinomiale, come mostrato in seguito:

$$V_{oc}(SOC) = a_0 + a_1SOC^1 + a_2SOC^2 + a_3SOC^3 + \dots + a_nSOC^n = \sum_i a_i SOC^i$$

Il termine  $V_{oc}$  rappresenta la tensione di circuito aperto, mentre  $a_i$  sono costanti che variano a seconda della batteria in esame. Per dimostrare che una funzione polinomiale è in grado di approssimare egregiamente l'andamento della tensione di una batteria in funzione dello stato di carica, si devono osservare le seguenti figure, Fig. 2.5-a, Fig. 2.5-b. In queste rappresentazioni si è voluto tracciare l'andamento della tensione in funzione del SOC per la carica e per la scarica di una batteria al Litio.

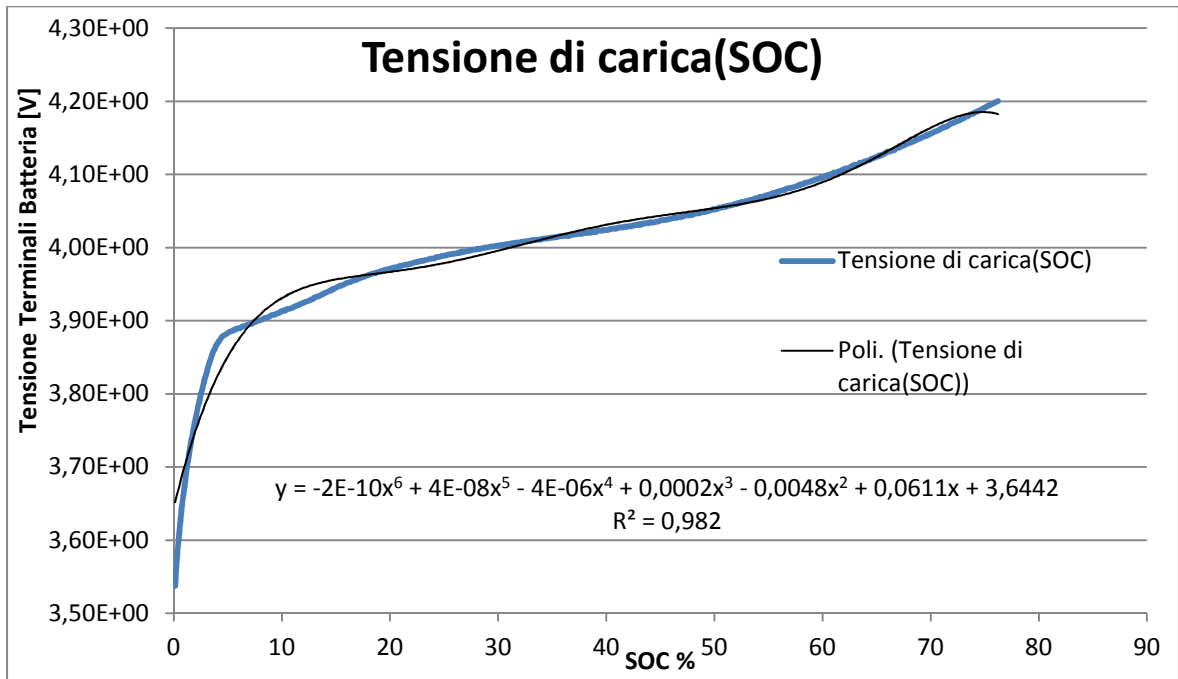


Fig. 2.5-a – Tensione in funzione dello stato di carica approssimata con una funzione polinomiale di sesto grado

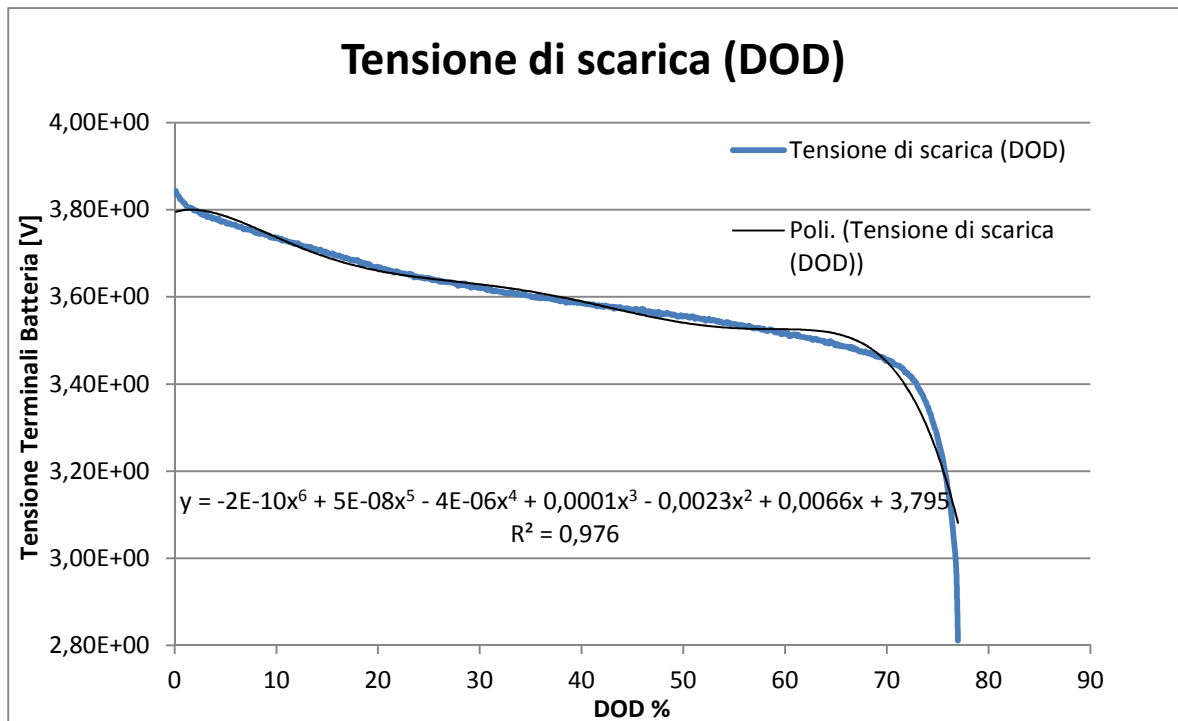


Fig. 2.5-b – Tensione in funzione della profondità di scarica approssimata con una funzione polinomiale di sesto grado

Non si vuole commentare la tipologia di carica e scarica effettuata in questi grafici, ma si vuole esclusivamente far notare come una funzione polinomiale sia in grado di approssimare discretamente l'andamento della tensione in funzione dello stato di carica. Si può affermare che questa funzione riesca ad approssimare la curva reale, osservando il valore di  $R^2$ :

- durante la carica il valore di  $R^2$  è pari a 0,982;
- durante la scarica il valore di  $R^2$  è pari a 0,976.

Come si può notare il valore dello scarto quadratico medio, è prossimo a 1, e quindi si può affermare che il risultato dato da una funzione polinomiale è un buon indicatore che lega lo stato di carica con la tensione. Se si osservassero le due figure si potrebbe pensare che le curve di carica e scarica siano identiche e solamente capovolte. Ma nella realtà non è così perché è probabile che la batteria in considerazione soffra del fenomeno dell'isteresi durante la carica e la scarica [32]. In altre parole la batteria durante la fase di carica si comporta in modo differente dalla scarica, e viceversa; percorrendo le curve di carica e scarica, proprio come avviene nell'isteresi magnetica dei materiali magnetici. Ciò è dovuto al fatto che la diffusione degli Ioni di Litio avviene in modo differente durante la carica e la scarica. Questa differenza tra la carica e la scarica si può apprezzare nella seguente figura, Fig. 2.5-c, dove si è riportata, la curva di scarica in funzione dello stato di carica (SOC), e non della profondità di scarica (DOD), come espresso in Fig. 2.5-b. Nei capitoli successivi quando si valuterà il modello circuitale di una batteria specifica, sarà spiegato come affrontare, se presente, il problema dell'isteresi.

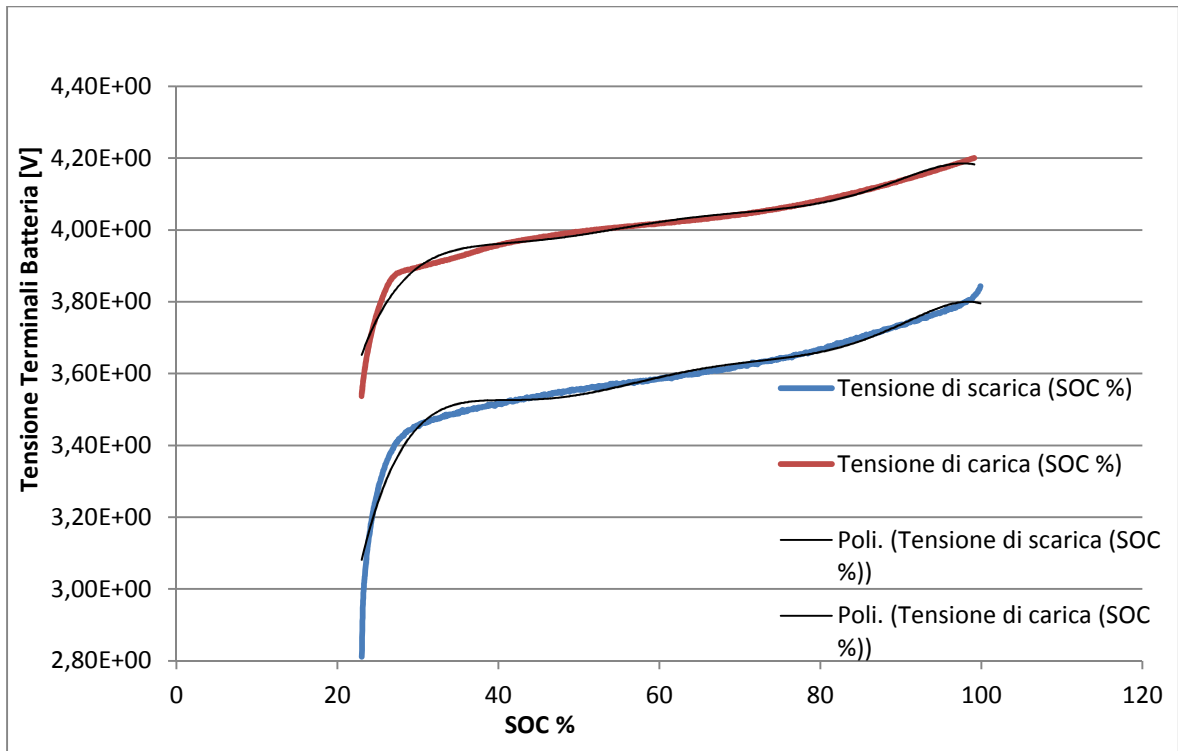


Fig. 2.5-c – Curve di carica e scarica in funzione del SOC, con la valutazione dell'isteresi

Questo fenomeno fa sì che il circuito equivalente debba avere due generatori di tensione, uno per la carica ed l'altro per la scarica, Fig. 2.6. Per utilizzare il generatore corretto durante la carica, e la scarica, si inseriscono due diodi in serie ai generatori, così da permettere la conduzione solo al diodo polarizzato direttamente. A valle dei generatori di tensione, come detto in precedenza, ci devono essere elementi resistivi ed elementi in grado di simulare una risposta transitoria della batteria. Ci sarà presente una resistenza serie chiamata  $R_0$  che dovrà modellizzare la resistenza interna dello Ione di litio. Successivamente ci sarà in serie il parallelo tra una capacità ed una resistenza  $R_1$  e  $C_1$  le quali hanno il compito di modellizzare il processo di diffusione dello Ione di Litio. Il circuito che si ottiene è illustrato della seguente figura, Fig. 2.6, e prende il nome di circuito equivalente di Thevenin [28].

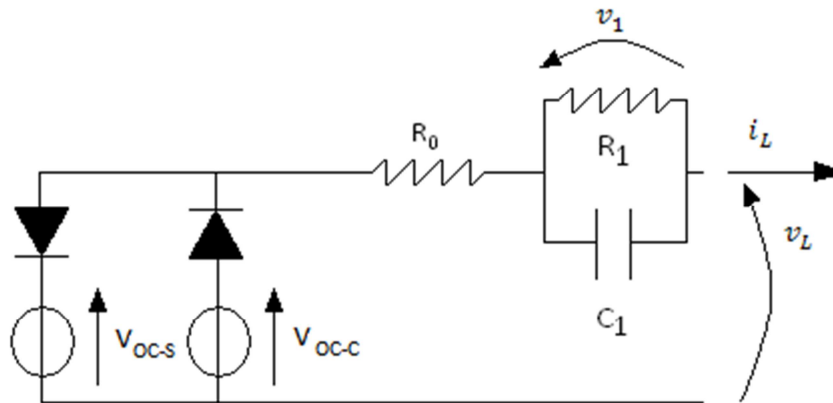


Fig. 2.6 – Circuito equivalente di Thevenin

Dove  $v_L$  e la corrente  $i_L$  sono rispettivamente la tensione e la corrente ai morsetti esterni della batteria. Mentre  $V_{OC-C}$  e  $V_{OC-S}$  sono rispettivamente le tensioni di circuito aperto durante la carica e durante la scarica. Dall'equazione di Thevenin alla maglia:

$$v_L = V_{oc} - v_1 - R_0 i_L$$

E dall'equazione di kirchhoff al nodo:

$$i_L = \frac{v_1}{R_1} + C_1 \frac{dv_1}{dt}$$

Si ricava facilmente il sistema di equazioni in grado di risolvere il circuito.

$$\begin{cases} v_L = V_{oc} - v_1 - R_0 i_L \\ \frac{dv_1}{dt} = -\frac{v_1}{R_1 C_1} + \frac{i_L}{C_1} \end{cases}$$

Questo circuito è il più utilizzato nella modellizzazione delle batterie al litio, soprattutto nelle applicazioni veicolari, perché di semplice caratterizzazione e simulazione, e ha una buona risposta ai transitori lenti ed a regime. Questo tipo di circuito però non risponde correttamente a transitori veloci. Questo perché la capacità  $C_1$  e la resistenza  $R_1$  formano una costante di tempo  $\tau_1$  elevata; ciò è dovuto al fatto che la  $C_1$  deve modellizzare esclusivamente la diffusione degli Ioni. Quello che però non viene tenuto in conto, con questo circuito equivalente, sono gli effetti capacitivi che si creano sulla superficie degli elettrodi. La modellizzazione di questo fenomeno, avviene tramite l'inserimento di un'ulteriore coppia formata da una capacità  $C_2$  in parallelo ad una resistenza  $R_2$ . Questi nuovi elementi avranno una costante di tempo  $\tau_2$  che sarà minore della  $\tau_1$ , e ciò permetterà una migliore risposta anche ai transitori più rapidi. Si otterrà un circuito equivalente come rappresentato nella seguente figura, Fig.2.7, che prende il nome di circuito DP Dual Polarization.

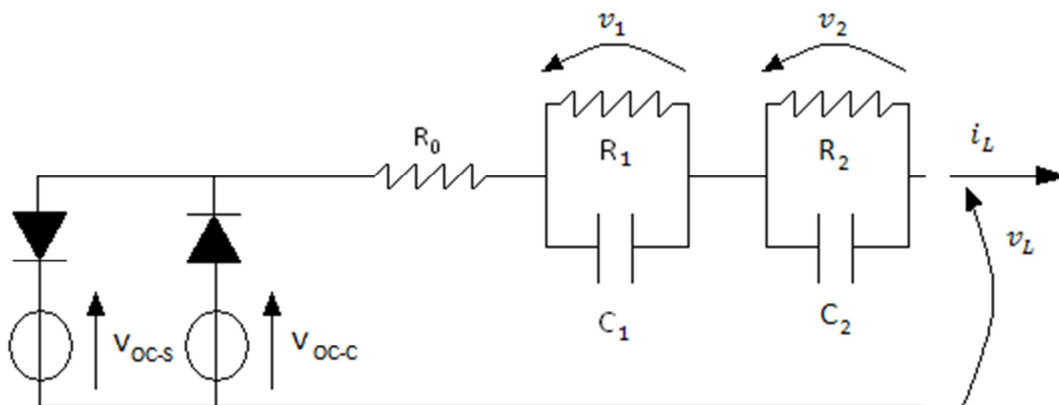


Fig. 2.7 – Circuito equivalente DP Dual Polarization

Le equazioni che permettono la risoluzione del circuito sono quelle che descrivono il circuito equivalente di Thevenin, insieme all'equazione legge al nodo del parallelo tra  $R_2$  e  $C_2$ :

$$i_L = \frac{v_2}{R_2} + C_2 \frac{dv_2}{dt}$$

Di conseguenza il sistema di equazioni che descrive il circuito DP, è il seguente:

$$\begin{cases} v_L = V_{oc} - v_1 - v_2 - R_o i_L \\ \frac{dv_1}{dt} = -\frac{v_1}{R_1 C_1} + \frac{i_L}{C_1} \\ \frac{dv_2}{dt} = -\frac{v_2}{R_2 C_2} + \frac{i_L}{C_2} \end{cases}$$

Questo circuito equivalente, è l'evoluzione del circuito equivalente di Thevenin, ma non è il circuito più accurato possibile. Questo perché manca la modellizzazione di un aspetto presente in qualunque batteria, non solo di quelle al Litio. Si sta parlando del fenomeno dell'autoscarica. Per modellizzare il fenomeno dell'autoscarica, bisogna pensare agli effetti che questo fenomeno provoca alla carica della batterie. Se un accumulatore viene lasciato per tanto tempo carico ed inutilizzato, esso perderà una parte della carica accumulata. Quindi è come se la batteria avesse ai capi dei suoi morsetti un carico in derivazione, molto elevato il quale drena sempre un po' di corrente facendo scaricare la batteria. Quindi la modellizzazione dell'autoscarica avviene tramite l'inserimento di una resistenza ai suoi terminali, come mostrato nella seguente figura, Fig. 2.8. Sempre in questa rappresentazione circuitale si vuole modellizzare l'ultimo e più complicato fenomeno che descrive la vita dell'accumulatore. Una batteria, sottoposta a cicli di lavoro, diminuisce la sua capacità di accumulare carica, come spiegato ampiamente nei paragrafi precedenti. Un modo per descrivere il fenomeno di degrado interno della batteria, risiede



nell'inserire elementi circuitali che non siano più costanti, ma variabili al passare del tempo e dei cicli di lavoro. Più precisamente, l'invecchiamento della batteria porterà all'aumento della sua resistenza interna  $R_1$  ed intensificherà il fenomeno dell'autoscarica, diminuendo il valore della resistenza  $R_p$ . Quindi, riferendoci sempre alla Fig. 2.8, la resistenza  $R_0$  e  $R_p$  saranno variabili ed più precisamente al crescere dei cicli di lavoro e della vita della batteria, la  $R_0$  aumenterà la  $R_p$  diminuirà.

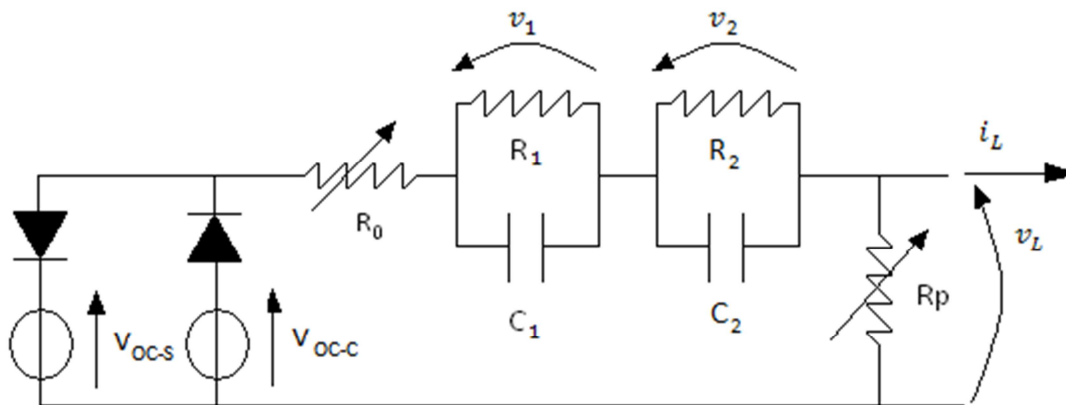


Fig. 2.8 – Modello di una batteria al Litio, con l'aggiunta della modellizzazione dell'autoscarica e dell'invecchiamento dell'accumulatore

Per questo circuito, non si vogliono indicare le equazioni che lo descrivono, in quanto sarebbero le stesse del circuito DP, con l'accorgimento che la resistenza  $R_0$  debba essere variabile, e che la corrente che lambisce i parametri serie, non è la corrente utile che fluisce ai morsetti della batteria, ma deve essere drenata della quota parte che fluisce nella resistenza  $R_p$ . Fino ad ora si è voluto elencare i passaggi necessari per poter capire come si debba procedere per la creazione di un circuito equivalente di una batteria al Litio. Nei capitoli successivi si parlerà delle modalità per ricavare i parametri caratteristici della batteria, effettuando le opportune semplificazioni al circuito, sino all'ottenimento del circuito adatto alle sperimentazioni che si realizzeranno. Nel successivo ed ultimo paragrafo di questo capitolo si vogliono elencare varianti al modello circuitale creato, i quali utilizzano esclusivamente un diverso approccio al problema, senza però creare grossi miglioramenti nella precisione dei risultati.

## 2.4 Altre tipologie di modelli elettrici circuitali

Per descrivere il funzionamento delle batterie al Litio, ci sono più tipi di circuiti equivalenti che si possono utilizzare. In questo paragrafo si vogliono indicare altre tipologie di circuiti equivalenti per modellizzare batteria al Litio da applicare a veicoli elettrici. Si vuole presentare una variante al modello DP, Fig. 2.9. Come si può notare il ramo derivazione è stato riportato a monte dei parametri serie; questo non induce troppi errori in quanto, una batteria al Litio, perde meno dello 0,3% della sua carica utile al giorno. In questo circuito si è voluto esplicitare chiaramente lo stato di carica tramite il condensatore  $C_{SOC}$  che viene caricato da una quota parte della corrente  $I_t$ , mentre la restante parte fluisce nella resistenza  $R_p$ .

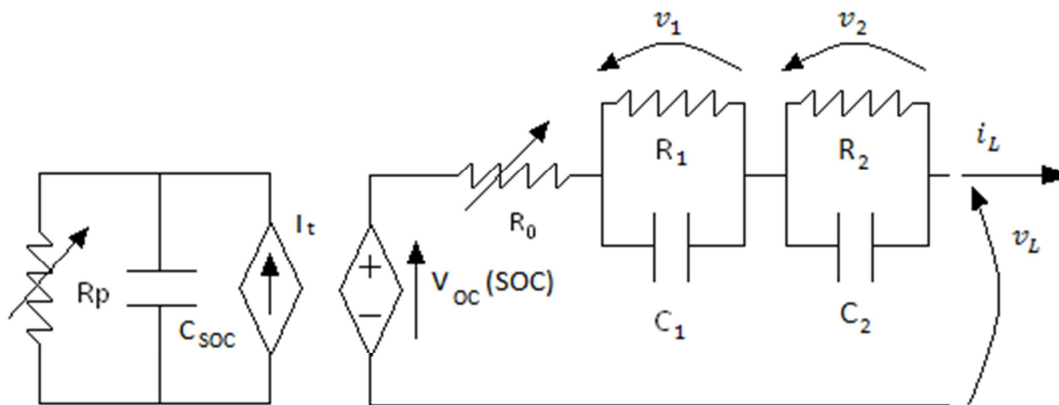


Fig. 2.9 – Variazione al modello DP

Si vuole presentare ora un altro modello circuitali che viene utilizzato per descrivere il comportamento delle batterie al Litio per uso veicolare, il modello PNGV. Esso è stato presentato dal consorzio PNGV (Partners of New Generation of Vehicles), il quale è formato da agenzie federali statunitensi e le principali corporazioni automobilistiche (USCAR, DaimlerChrysler, Ford Motor Company, General Motors Corporation). Questo tipo di modello ha come struttura base il modello di Thevenin, con l'aggiunta di un ulteriore condensatore  $C_p$ , Fig. 2.10, che vuole rappresentare il cambiamento della tensione  $V_{oc}$  quando la batteria è connessa ad un carico. In altre parole la tensione di circuito  $V_{oc}$ , prima del collegamento con il carico, è pari alla tensione ai morsetti della

batteria  $V_L$ . La  $V_{oc}$  non sarà più la solita funzione polinomiale, ma in questa rappresentazione circuitale è una tensione costante. Mentre la variazione della tensione viene rappresentata tramite il condensatore  $C_p$ . Per questo motivo il circuito può essere rappresentato con una sua semplificazione, adatta a rappresentare solamente la risposta dinamica della batteria, Fig. 2.11. Dove la tensione ai morsetti della batteria non è la piena tensione, ma è la sola quota parte che varia.

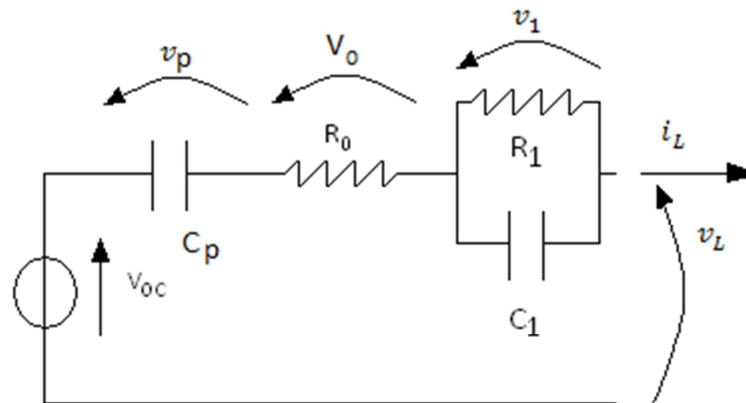


Fig. 2.10 – Modello PNGV

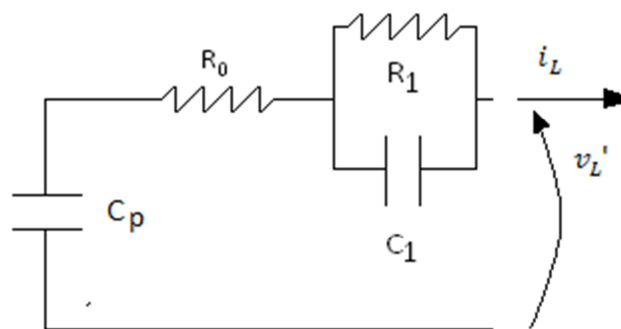


Fig. 2.11 – Modello PNGV semplificato

Infine si vuole descrivere un ulteriore modello, un po' differente dagli ultimi modelli citati perché non ha come struttura circuitale base il modello di Thevenin, si sta parlando del modello RC. Esso è stato creato dalla SAFT Battery Company, e come si può notare nella Fig. 2.12, è formato da due condensatori  $C_c$ ,  $C_b$  e da tre resistori  $R_t$ ,  $R_e$ ,  $R_c$ . La capacità  $C_c$ , è

molto piccola e rappresenta gli effetti superficiali della batteria, infatti prende il nome di surface capacitor. La capacità  $C_b$  invece, è molto elevata, e rappresenta la capacità della batteria di immagazzinare cariche elettriche; prende il nome di bulk capacitor. Per quanto riguarda le resistenze: la  $R_e$  rappresenta la resistenza interna della batteria, la  $R_t$  la resistenza dei terminali della batteria, mentre la resistenza  $R_c$ , chiamata capacitor resistor, è la resistenza che modella il comportamento reale del surface capacitor.

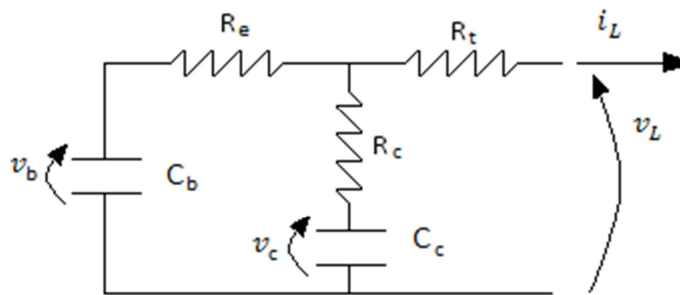


Fig. 2.12 – Modello RC

Queste sono altre possibili modellizzazioni circuitali di batterie al Litio, come si è potuto notare, in queste varianti circuitali non si è considerata l'isteresi interna della batteria, ma come si potrà notare in seguito, è molto usuale considerare una curva di isteresi piatta, e pari ad una curva trovata come media, punto per punto della curva di carica e di scarica. Nel capitolo successivo si procederà ad illustrare un banco prova per effettuare test sulle batterie al Litio, così da procedere con le sperimentazioni che permetteranno di ricavare tutti i parametri costituenti i circuiti equivalenti.

## **3. Banco prova per test su batterie al Litio**

### **3.1 Introduzione**

In questo capitolo, si vuole parlare di come si è proceduto ad allestire e realizzare un banco per testare batterie al Litio. Le prove che si andranno ad eseguire serviranno a ricavare i parametri del circuito equivalente e gli andamenti della tensione interna della batteria. Successivamente si vorrà anche testare come dalla tensione di circuito aperto sia possibile ricavare lo stato di carica della batteria, applicando questo studio alla gestione di ricarica dei veicoli elettrici. Per far ciò bisogna elencare inizialmente la strumentazione necessaria per effettuare le prove e gli accorgimenti da tenere in considerazione. La grandezza fondamentale nel test di batterie al Litio è lo stato di carica. Se questa grandezza non è nota a chi sta testando la batteria, non è possibile estrarre gli andamenti della tensione interna della batteria, e nemmeno estrarre i parametri costituenti il circuito equivalente. Per conoscere lo stato di carica della batteria, è necessario conoscere la corrente che in quel test si sta fornendo alla batteria, se in carica, oppure che si sta estraendo dalla batteria, se in scarica. Come si è già potuto notare nei paragrafi precedenti, la tensione interna di una batteria, parte da un valore massimo e decresce fino ad un valore minimo. Per poter ottenere la variazione di tensione corretta della batteria, è necessario che la corrente durante la carica e la scarica sia perfettamente costante. Per questo motivo nel paragrafo successivo si dovrà illustrare come si è proceduto nel realizzare un carico elettronico, in grado estrarre dalla batteria una corrente costante al variare della tensione interna della batteria. In più si dovranno realizzare le protezioni di tensione massima e minima necessari per non superare le soglie di tensione massima e minima applicabile alla batteria. Per quanto riguardano le protezioni in corrente, esse non vengono realizzate in quanto si faranno test esclusivamente a corrente impressa e di conseguenza essa sarà nota e completamente sotto controllo. Prima di descrivere la realizzazione ed il funzionamento dei circuiti elettronici costituenti il carico e le protezioni, si vogliono elencare le strumentazioni di misura che verranno utilizzate durante i test alla batteria.

## 3.2 Strumenti utilizzati

L'acquisizione dei dati sarà effettuata tramite un Data Logger, Fig. 3.1, più precisamente modello AGILENT 34970A. Esso può effettuare una misura fino a 7 Digits e non introdurrà ulteriori errori di misura se la temperatura di utilizzo sarà compresa tra 18°C ed i 28°C. Il Data Logger monitorerà la tensione ai capi della batteria, e la corrente che percorre il terminale positivo della batteria stessa. Esso ha disponibili numerosi canali per la lettura dei valori, ma sarà in grado di leggere valori di grandezze espresse in tensione. Per questo motivo si è scelto di inserire una pinza Amperometrica, Fig. 3.2, al terminale positivo della batteria, la quale è in grado di misurare una corrente, trasdurla in un segnale proporzionale in tensione ed mandarlo in ingresso al Data Logger. La limitazione della lettura della pinza Amperometrica a 3 Digits comporta una limitazione nella precisione della lettura del valore della corrente. Per questo motivo si è scelto di inserire in serie al circuito di prova un multimetro digitale in grado di rilevare con maggiore accuratezza il valore della corrente di prova. La misura della pinza Amperometrica verrà comunque considerato in quanto è l'unico modo per visualizzare la grandezza corrente a video e quindi poter rielaborare i dati a PC.



Fig. 3.1 – Data Logger Agilent 34970A



Fig. 3.2 – Pinza amperometrica

Per ora si sono elencati gli strumenti necessari all'acquisizione dati; il passo successivo risiede nell'elencare gli strumenti utilizzati per alimentare la batteria ed i circuiti elettronici. Per far ciò occorrono due generatori:

- GENERATORE PRINCIPALE per la carica della batteria, in grado di fornire una tensione massima di 32V, ed una corrente massima di 5A, Fig. 3.3. Questo generatore sarà utilizzato anche per simulare la batteria, durante le varie prove di caratterizzazione del circuito elettronico, e del circuito di protezione.
- GENERATORE SECONDARIO per l'alimentazione dei circuiti elettronici, Fig. 3.4, è in grado di fornire una tensione massima di 32V, ed una corrente massima di 2A. Dovrà fornire l'alimentazione necessaria al corretto funzionamento dei componenti elettronici del carico elettronico e del circuito di protezione.



Fig. 3.3 – Generatore Principale

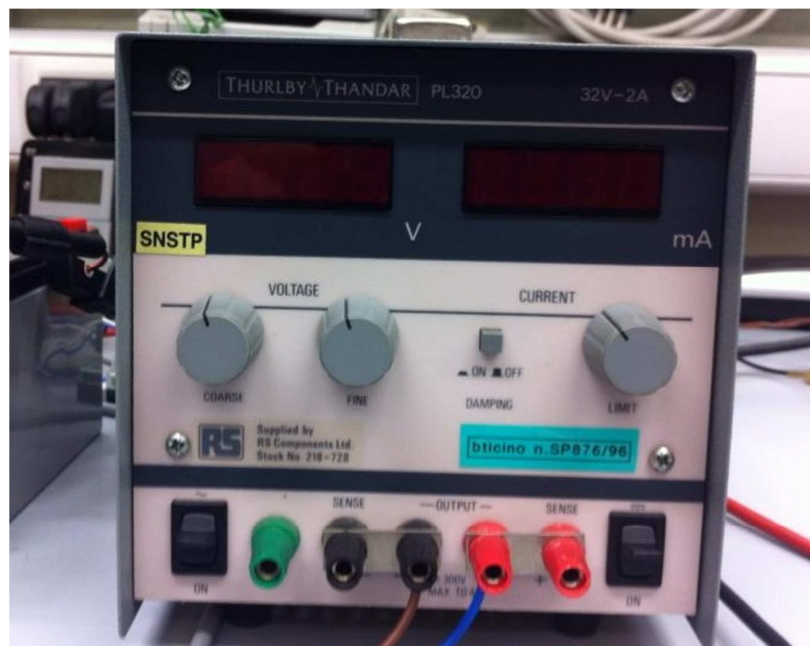


Fig. 3.4 – Generatore Secondario

L'ultimo strumento da definire è lo switcher temporizzato, Fig. 3.5. Questo strumento particolare è un interruttore con due contatti, uno normalmente chiuso, e l'altro normalmente aperto. Questi contatti sono comandati da un temporizzatore e l'utente



deve scegliere il tempo di apertura e di chiusura dei contatti così da interrompere o fornire l'alimentazione al circuito. I tempi da scegliere sono composti da un tempo base  $t_a$ , il quale definisce la base del periodo, ed un tempo  $t_b$ , il quale definisce l'intervallo di tempo all'interno del tempo base, dove i contatti sono commutati. Questo strumento è fondamentale per definire l'istante esatto di apertura del circuito nelle prove di valutazione della tensione interna della batteria, e per le prove di correlazione tra la tensione di circuito aperto e lo stato di carica. Queste prove verranno analizzate in dettaglio nel capitolo successivo.

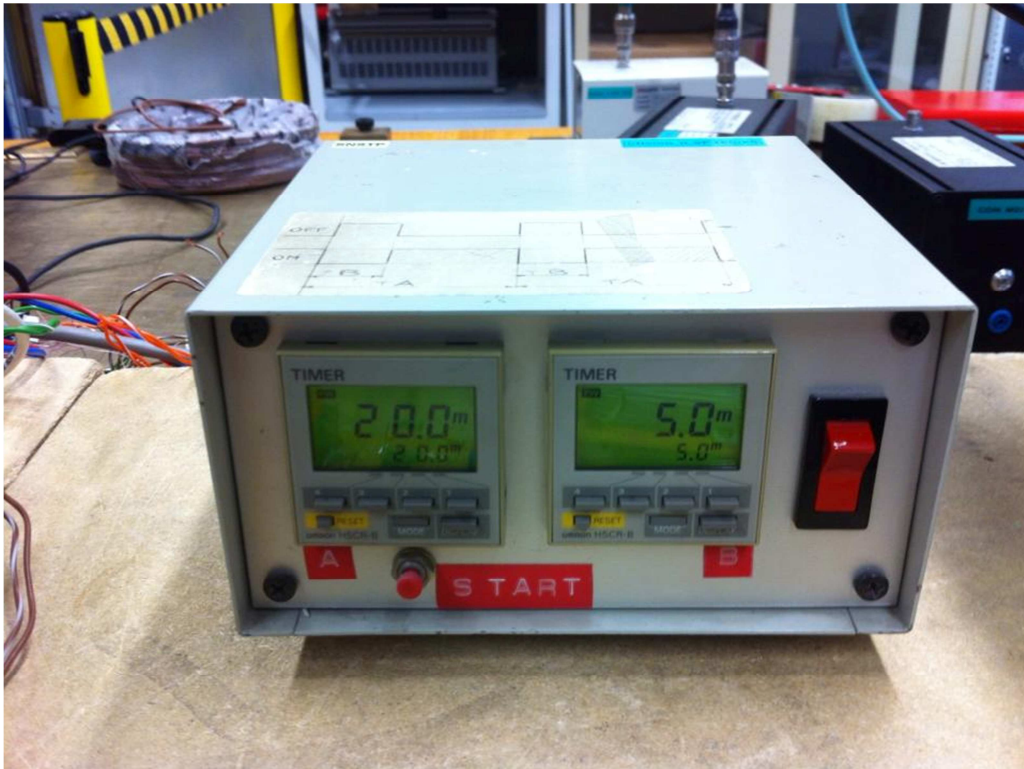


Fig. 3.5 – Switcher temporizzato

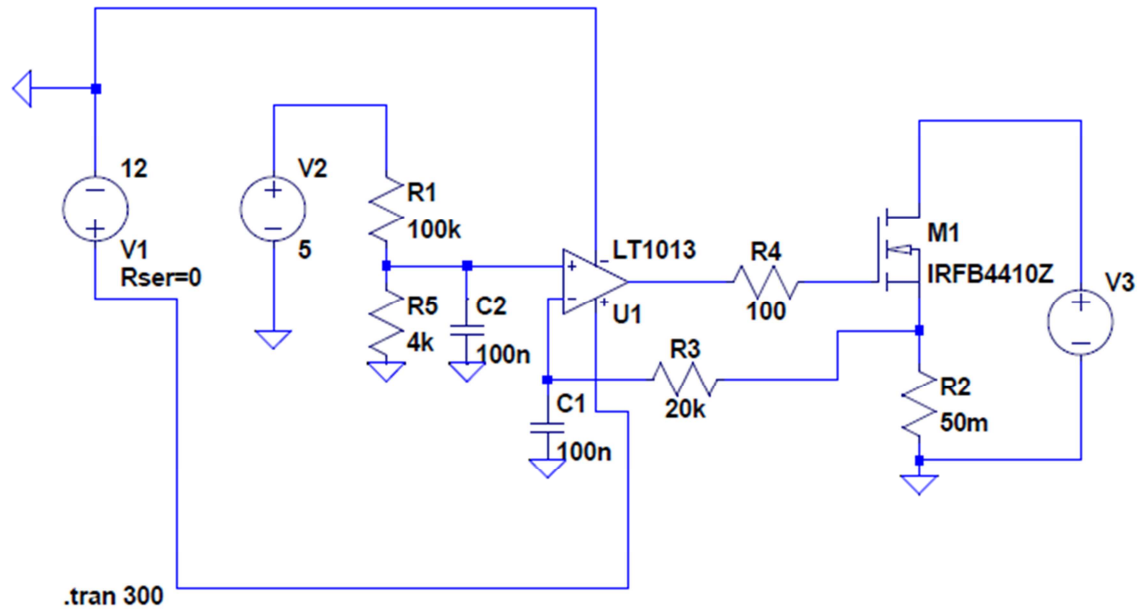
### 3.3 Realizzazione carico elettronico

Come già ampiamente detto nei punti precedenti, la tensione ai capi di una batteria, non è costante, ma varia da un valore massimo ad un valore minimo, approssimabile ad una funzione polinomiale. Se il carico di prova fosse una semplice resistenza, essa assorbirebbe una corrente variabile, con un andamento anch'esso compreso tra un valore

massimo, in corrispondenza del valore massimo di tensione applicata, ed un valore minimo, in corrispondenza del valore minimo di tensione applicata. Quindi con una semplice resistenza non sarà imposta una corrente costante, ma sarà variabile. L'importanza della corrente costante è indispensabile per conoscere lo stato di carica estratto o fornito, e per caratterizzare la risposta della batteria a diversi valori di corrente. In più durante la carica di una batteria, come già detto precedentemente, la corrente nella prima parte di carica è costante, di conseguenza è opportuno, per una corretta valutazione della tensione, che anche la corrente di scarica si costante. Altrimenti le curve di tensione di carica e scarica non saranno duali. Quindi è necessario che il carico a cui viene collegato l'accumulatore, sia variabile, ed imponga sempre lo stesso valore di corrente. La soluzione proposta, per imporre un valor di corrente costante, sta nell'utilizzo di un amplificatore operazionale, a comando di un Mosfet. Un amplificatore operazionale in configurazione invertente, è in grado di riportare il valore di tensione dal morsetto negativo a quello positivo, variando la tensione d'uscita. In altre parole, si vuole imporre un determinato valore di tensione in ingresso, il quale sarà amplificato in uscita dall'amplificatore. La tensione in uscita comanderà la tensione tra Gate e Source del Mosfet, così che la corrente tra Drain e Source sia fissata al valore desiderato e costante. Al Source del transistor sarà collegata una resistenza  $R_2=50\text{m } \Omega$  per leggere la corrente di scarica, convertirla in tensione e riportare tale valore in retroazione sul morsetto invertente dell'amplificatore; tale valore sarà confrontato con il riferimento fissato al morsetto non invertente. La corrente d'uscita si ricaverà con la seguente relazione:

$$I_{out} = \frac{V^-}{R_2} = \frac{V^+}{R_2}$$

Il morsetto positivo della batteria sarà collegato al Drain del Mosfet, mentre il negativo alla massa di riferimento del circuito, tra questi due punti sarà presente la tensione variabile della batteria. Il circuito è visibile nella seguente figura, Fig. 3.6. La simulazione circuitale sarà effettuata con il simulatore LTSpice il quale sarà in grado di dimostrare tutto ciò che è stato appena dichiarato.



- V1 = generatore principale 12V
- V2 = regolatore di tensione 5V
- V3 = generatore fittizio, simulante la tensione della batteria

Fig. 3.6 – Carico elettronico

Nella simulazione circuitale vi è un generatore che alimenta a 12V l'amplificatore operazionale, ed un secondo generatore che impone 5 V al partitore di tensione in ingresso all'amplificatore. Nella realtà vi sarà un unico generatore di tensione, denominato precedentemente GENERATORE SECONDARIO, che imporrà 12 V sia all'alimentazione dell'amplificatore che ad un regolatore di tensione che a sua volta imporrà 5 V al partitore di tensione. Tra il Drain del Mosfet e la massa vi è collegato un generatore di tensione  $V_3$ , il quale è fittizio e serve a modellizzare l'andamento della tensione ai terminali di una generica batteria. La funzione che descrive il generatore è simile ad una tensione ai terminali di una batteria, la quale varierà tra il valore massimo fissato a 4,2V ed il valore minimo fissato a 2,8V. Come si può notare nella Fig. 3.7, al variare della tensione ai capi del fittizio generatore di tensione, la corrente rimane costante e con valore pari a 3,84 A.

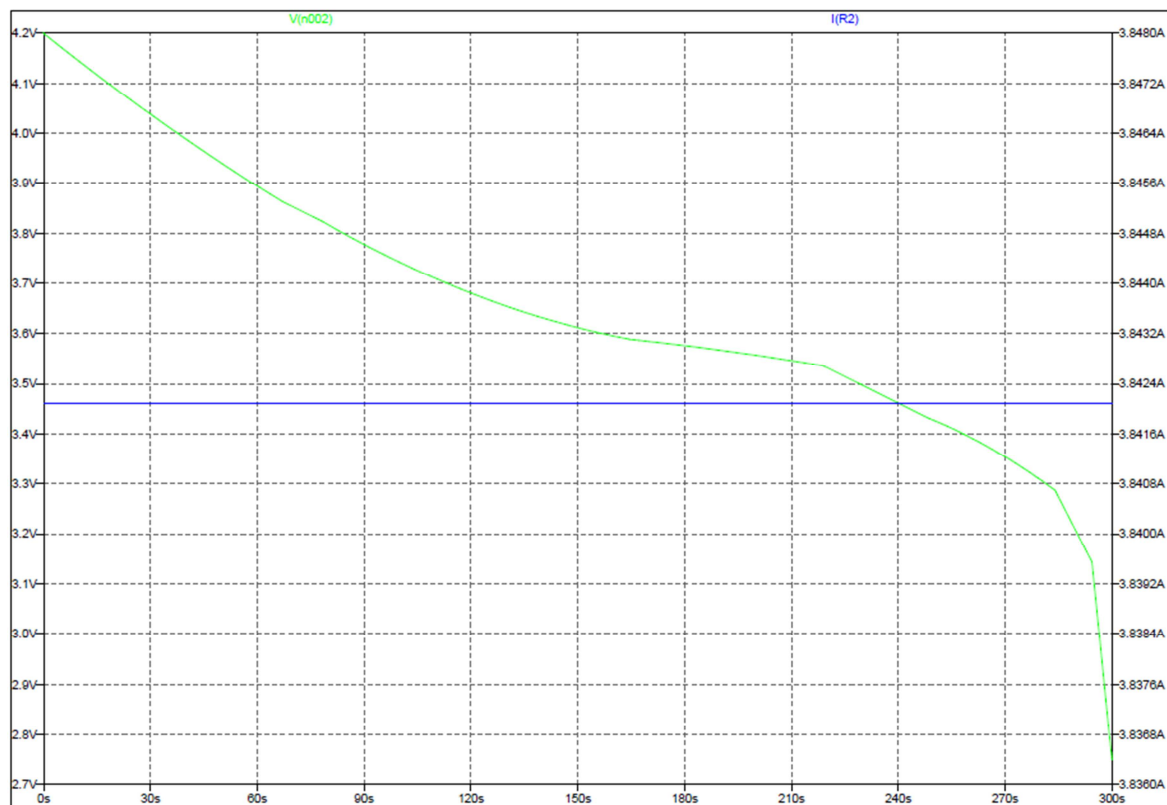


Fig. 3.7 – Andamento tensione e corrente ai capi del generatore fittizio

Il problema che sorge ora sta nel decidere come fissare il valore di corrente desiderato durante la scarica. La soluzione è variare la tensione d'ingresso dell'amplificatore, e per far ciò basta cambiare la resistenza verso terra del partitore resistivo, chiamata nello schema di Fig. 3.6,  $R_5$ . Perché è proprio il partitore che imprime la tensione all'ingresso dell'amplificatore, fissando il potenziale deciso ai capi della resistenza  $R_5$ . Successivamente si vuole mostrare variando la resistenza  $R_5$ , come varia la corrente ai terminali della batteria, Fig. 3.8.

R5 [kΩ]	Ib[A]
20	16,6658
19	15,9654
18	15,253
17	14,5285
16	13,7915
15	13,0417
14	12,2788
13	11,5023
12	10,712
11	9,9074
10	9,0881
9	8,2539
8	7,4022
7	6,5387
6	5,6568
5	4,7581
4	3,8421
3	2,9083
2	1,9562
1	0,9835

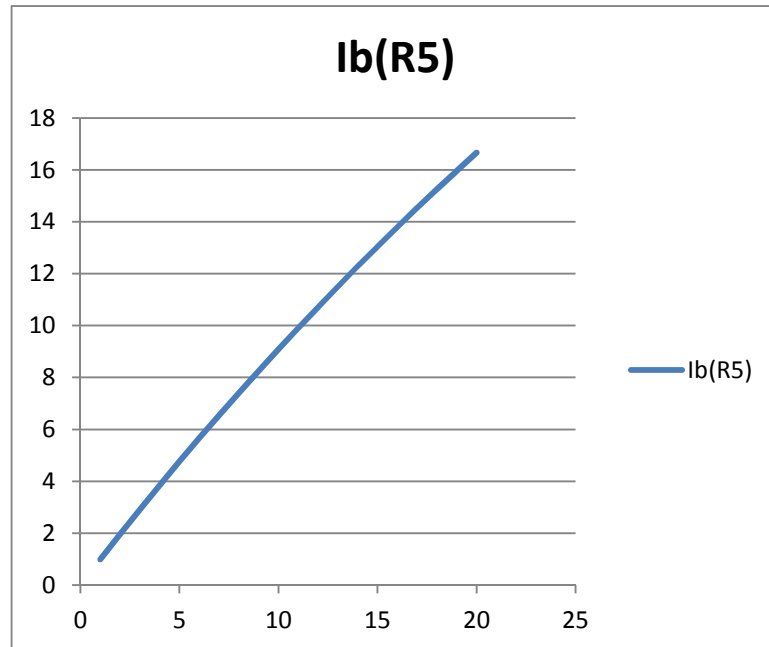


Fig. 3.8 – Andamento corrente al variare della resistenza  $R_5$

Nella realtà verrà installato un trimmer, al posto della resistenza  $R_5$ . In questo modo si agirà sul trimmer all'inizio di ogni prova, fino a quando il valore di corrente non sia identico al valore di corrente desiderato per quella prova di scarica che si sta considerando. In più il valore di  $50m\Omega$  della resistenza  $R_2$  verrà raggiunto inserendo due resistenze da  $100m\Omega$  in parallelo che chiameremo  $R_{2a}$  ed  $R_{2b}$ . Il circuito elettronico realizzato realmente è stato saldato su di una scheda multiferri, come indicato della Fig. 3.9.

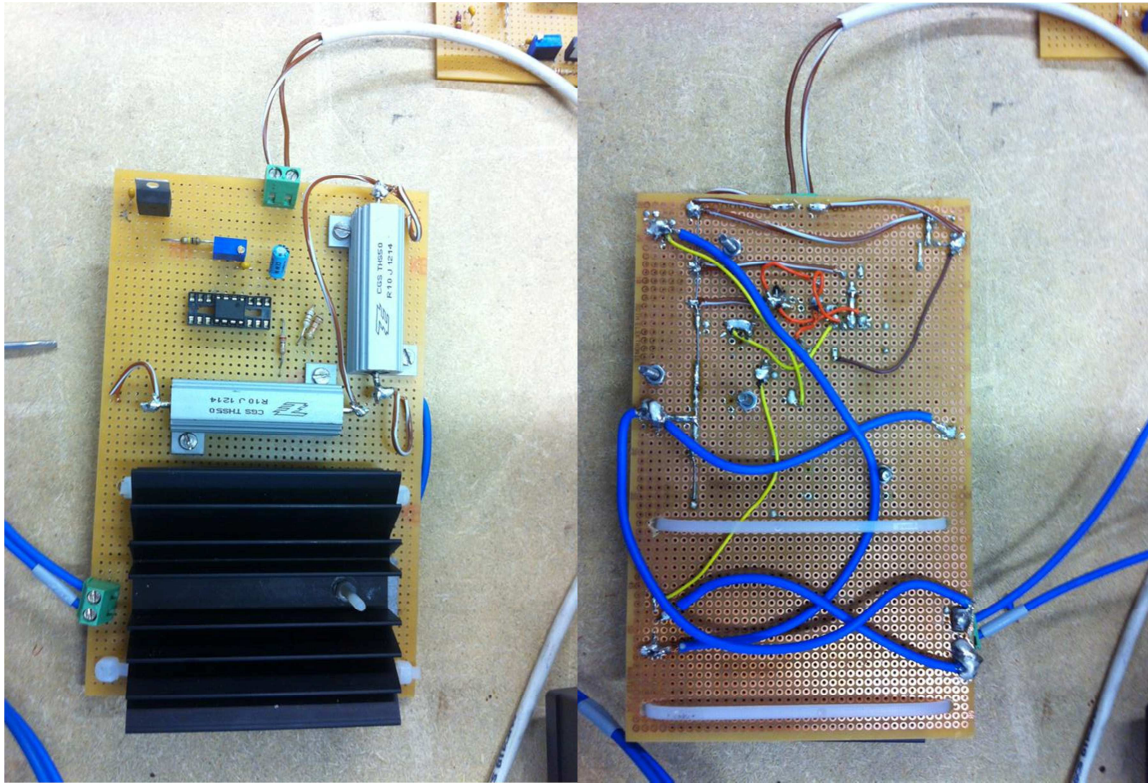


Fig. 3.9 – Carico elettronico fronte e retro

Una volta realizzato il circuito, si deve procedere con il test di funzionamento reale. Si è alimentato il circuito con il generatore secondario, e si è simulata al batteria con il generatore principale. Non si è voluto collegare direttamente la batteria per non danneggiarla, a causa di mal funzionamenti circuitali. Nel test che si è voluto effettuare si è fornita una tensione inizialmente costante, si è stabilito un valore di corrente, e successivamente sono state effettuate repentine variazioni della tensione, valutando la variazione della corrente ottenuta. Successivamente si voluto graficare i valori di corrente ottenuta in funzione della variazione della tensione, Fig. 3.10. Come si può notare vi sono delle piccole fluttuazioni della corrente che portano ad una variazione massima percentuale pari allo 0,14%.

n°misura	Vgen[V]	Igen[A]
1	3,6	4,872
2	3,7	4,871
3	3,8	4,872
4	3,9	4,87
5	4	4,87
6	4,5	4,87
7	3,5	4,87
8	3,4	4,869
9	3,3	4,869
10	3,2	4,868
11	3,1	4,868
12	3	4,867
13	2,5	4,868
14	2,1	4,868
15	4,2	4,867
16	2,8	4,865

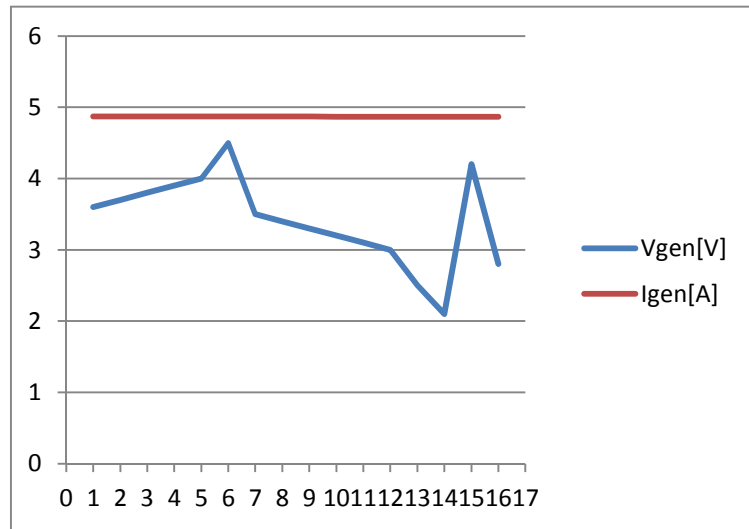


Fig. 3.10 – Valutazione reale della corrente al variare della tensione

Da questi risultati sperimentali si può constatare che la corrente si mantiene costante per tutte le variazioni della tensione, anche per quelle più repentine. Un'altra variabile critica, che deve essere valutata prima di poter utilizzare questo circuito per le prove sulle batteria al Litio, è la temperatura. Questo circuito è dimensionato per poter effettuare prove fino a 5A e quindi è possibile che la corrente provochi un aumento di temperatura elevato sul Mosfet e che può portare a guastare il componente. Quindi si deve ragionare sul range di temperature di funzionamento ammissibile del transistor, e in funzione della temperatura, ragionare se è opportuno installare un dissipatore. Secondo il Datasheet del Mosfet, vi sono i seguenti dati, termici:

- $-55^{\circ}\text{C} < T < 175^{\circ}\text{C}$ , range di temperature di funzionamento della giunzione del Mosfet;
- $R_{JA} = 62^{\circ}\text{C/W}$ , resistenza termica tra la giunzione e l'ambiente;

Si sceglie di dimensionare il carico elettronico per una corrente massima di  $5A^{20}$ , e si suppone una tensione massima applicabile alla batteria pari a  $5V^{21}$ . Per questo motivo, nel caso peggiore, sul transistor verrà dissipata una potenza pari a  $25W$ , e di conseguenza la temperatura sulla giunzione sarebbe pari a  $1550^{\circ}C$ . Un valore di questo tipo porterebbe alla distruzione del transistor; per questo motivo è più che doveroso installare un dissipatore. Si è scelto un dissipatore con una resistenza termica  $R_D$  pari a  $2.5^{\circ}C/W$  e tra il case del Mosfet ed il dissipatore si è applicata una guaina isolante elettricamente, ma conduttrice termicamente, con resistenza interna  $R_I$  pari a  $1.31^{\circ}C/W$ , Fig. 3.11.

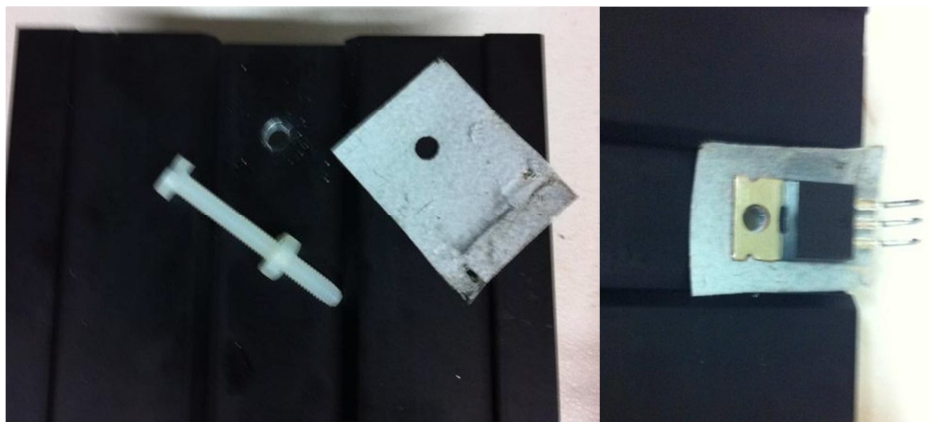


Fig. 3.11 – Assemblaggio Dissipatore Mosfet

Bisogna passare quindi ad verificare teoricamente che il transistor rimanga nel range di funzionamento consentito. Dal datasheet del transistor prendiamo i valori di resistenza termica tra la giunzione ed il case e tra il case e la superficie verniciata del transistor:

- $R_{JC} = 0.65^{\circ}C/W$ , Junction – Case;
- $R_{CS} = 0.50^{\circ}C/W$ , Case – Sink;

Si può vedere il circuito termico come nella seguente figura, Fig. 3.12.

<sup>20</sup> Un valore di corrente così elevata può permettere di testare celle anche di modeste capacità.

<sup>21</sup> Le celle agli Ioni di Litio hanno valori di tensione ai morsetti che dipendono dalla taglia della batteria. In commercio, però si tende ad avere celle con diversa capacità, ma con tensione massima applicabile all'intorno dei  $4.2V$ . Per questo motivo si è scelta una tensione di dimensionamento pari a  $5V$ , così da avere un margine utilizzabile in futuro.



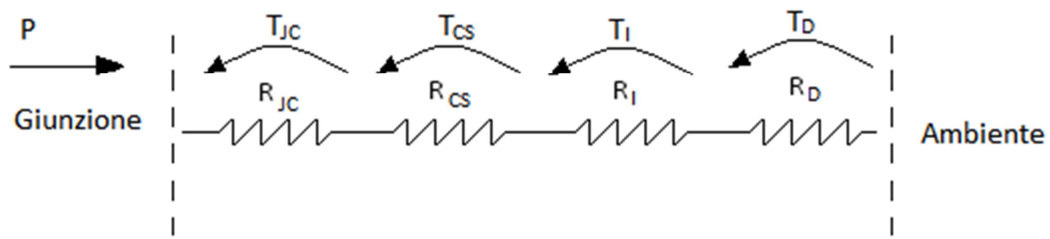


Fig. 3.12 – Circuito termico tra la giunzione e l'ambiente

Supponendo una temperatura ambiente  $T_a=25^\circ\text{C}$  si può ricavare la temperatura di giunzione  $T_j$ , supponendo una potenza pari a 25W, con la seguente relazione:

$$T_j = P(R_D + R_I + R_{CS} + R_{JC}) + T_a = 146^\circ\text{C}$$

Il valore trovato si trova ampiamente nel range delle temperature di funzionamento consentite del transistor. Un ulteriore problema, che può sorgere per lunghe prove con correnti di 5A, è la possibile variazione del valore delle resistenze collegate sul Source del Mosfet, che può portare ad una fluttuazione della corrente. È quindi doveroso effettuare una prova di temperatura sul Mosfet e sulle resistenze collegate tra il Source e la massa. La lettura della temperatura verrà eseguita con una sonda di temperatura direttamente sulle resistenze, ma a causa dell'inaccessibilità del case del Mosfet, la misura di temperatura verrà eseguita sul dissipatore, e quindi successivamente i valori di temperatura saranno riportati sul case del Mosfet, come già spiegato precedentemente. Nella Fig. 3.13, sono riportati i valori di temperatura sulla resistenze  $R_{2a}$ ,  $R_{2b}$  e su dissipatore, con una tensione pari a 4.2V ed una corrente di 4.9A.

t[min]	TR <sub>2a</sub> [°C]	TR <sub>2b</sub> [°C]	Td [°C]
0	24	24	24
5	28,7	30	49,7
10	30,5	32,2	62,7
15	32	36,3	70
20	33,1	38,9	75,2
25	34,8	40,1	77,4
30	34,6	40,4	78,7
35	34,7	40,7	80,4
40	35,4	40,3	80,3
45	35,4	40,2	80,8
50	35,6	40,3	79,9
55	35,6	41,1	80,5
60	35,3	40,7	81,2

Fig. 3.13 – Prove di temperatura

La temperatura ambiente sarà quella all'istante  $t=0$  quindi  $24^{\circ}\text{C}$ , la massima temperatura registrata è pari a  $81,2^{\circ}\text{C}$  sul dissipatore,  $41,1^{\circ}\text{C}$  sulla resistenza  $R_{2b}$  (che nella realtà è quella posta più vicino al dissipatore, motivo per il quale ha temperature più alte rispetto a  $R_{2a}$ ), infine  $35,6^{\circ}\text{C}$  sulla resistenza  $R_{2a}$ . Valutiamo come primo punto la temperatura sulla giunzione: il modo di procedere è uguale al caso già effettuato prima, per questo motivo si sceglie di riportare esclusivamente il risultato numerico, ricordando che la potenza impiegata in questa prova è  $20.58\text{W}$ . La temperatura sulla giunzione è pari a:  $131,8^{\circ}\text{C}$ , quindi il Mosfet si trova a lavorare nel range di temperatura ammesse. Per quanto riguarda la fluttuazione delle resistenze la differenza di temperatura su di esse è pari a:

- $\Delta TR_{2a} = 35,6^{\circ}\text{C} - 24^{\circ}\text{C} = 11,6^{\circ}\text{C}$
- $\Delta TR_{2b} = 41,1^{\circ}\text{C} - 24^{\circ}\text{C} = 17,1^{\circ}\text{C}$

Dal datasheet delle resistenze, si trova che la variazione di resistenza interna è  $50\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ , e quindi si ha una differenza di resistenza pari a:

- $\Delta R_{2a} = 580\text{ppm}/^{\circ}\text{C} \rightarrow 0,058\text{m}\Omega$

- $\Delta R_{2b} = 855\text{ppm}/^\circ\text{C} \rightarrow 0,0855\text{m}\Omega$

Quindi una variazione di resistenza minima, che non porta a grandi fluttuazioni della corrente. Queste prove sono state assolutamente doverose per poter procedere correttamente con i test sulla batteria a corrente costante.

### 3.4 Realizzazione circuito di protezione

Una batteria al Litio, a differenza di altre tipologie di batterie, è molto sensibile al valore delle grandezze elettriche applicate ai suoi morsetti. Di conseguenza bisogna far sì che la tensione applicata ai morsetti rimanga compresa tra il suo valore massimo sopportabile, ed il suo valore minimo applicabile. Per questo motivo è indispensabile avere un circuito che interrompa la carica o la scarica della batteria al valore di tensione corretto, e che protegga la batteria, nel caso venga applicato un valor di indesiderato di tensione. Si è parlato esclusivamente di protezione in tensione, perché tutte le prove di caratterizzazione della batteria saranno fatte a corrente impressa, e di conseguenza il valore di quella grandezza è ampiamente sotto controllo. Mentre per la tensione, essa è libera di variare e non viene imposta durante i test, quindi potrebbe accadere che la batteria rimanga in carica, con una corrente costante, per un tempo superiore al tempo di raggiungimento della piena carica. In questo caso la tensione ai morsetti della batteria supererebbe il valore di tensione massima applicabile, provocando tutti gli effetti dovuti ad una tensione troppo elevata, già elencati nei capitoli precedenti. Dualmente può accadere, durante la scarica, che la batteria, rimanga collegata al carico elettronico per un tempo maggiore al tempo che impiegherebbe al raggiungimento della completa scarica. Questo provocherebbe una scarica troppo profonda, facendo crollare la tensione al di sotto della soglia minima di tensione applicabile. È quindi necessario avere una protezione di massima tensione, in carica, ed una protezione di minima tensione in scarica. Si è pensato di realizzare queste protezioni con due comparatori, che comandano l'accensione di due BJT. I due BJT forniscono oppure interrompono la tensione ai capi di un relè, il quale comanda un interruttore, in serie all'alimentazione, che provvederà ad aprire o chiudere il circuito di alimentazione della batteria. In Fig. 3.14, si mostrano i

circuiti di protezioni di massima e di minima tensione realizzati su di un'unica scheda elettronica.

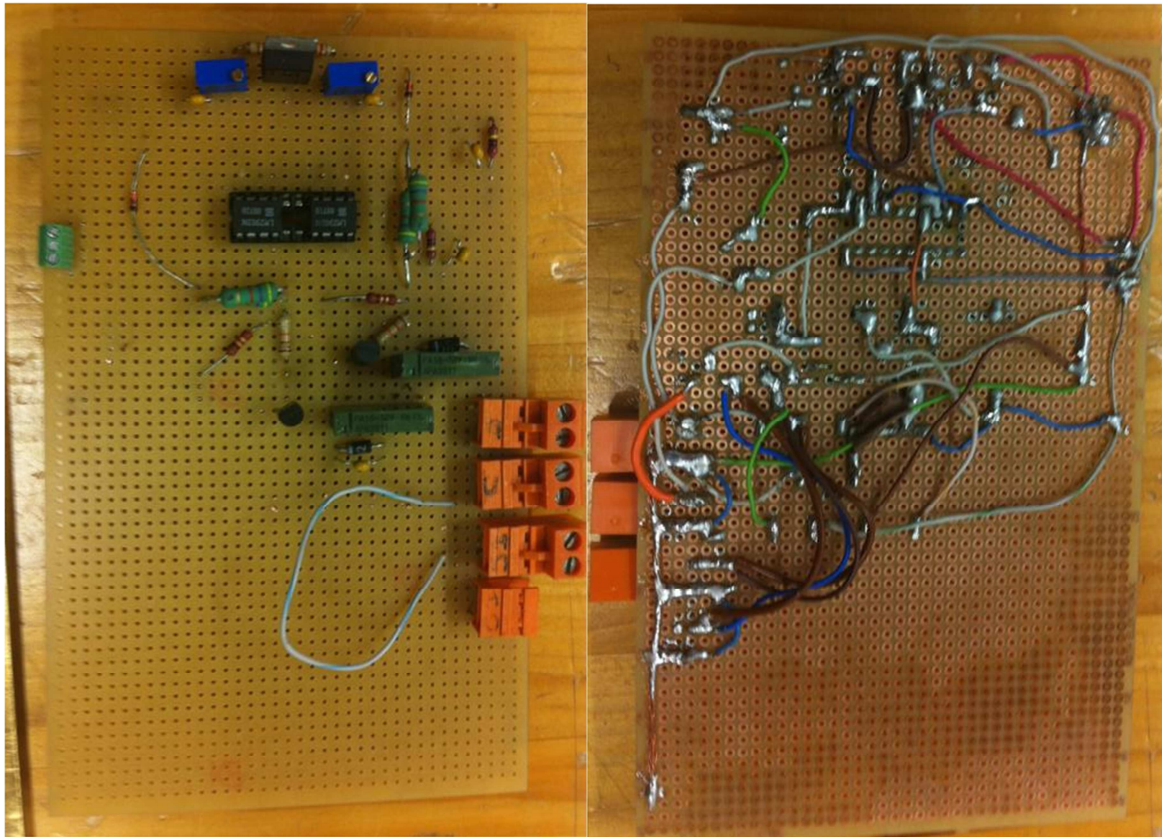
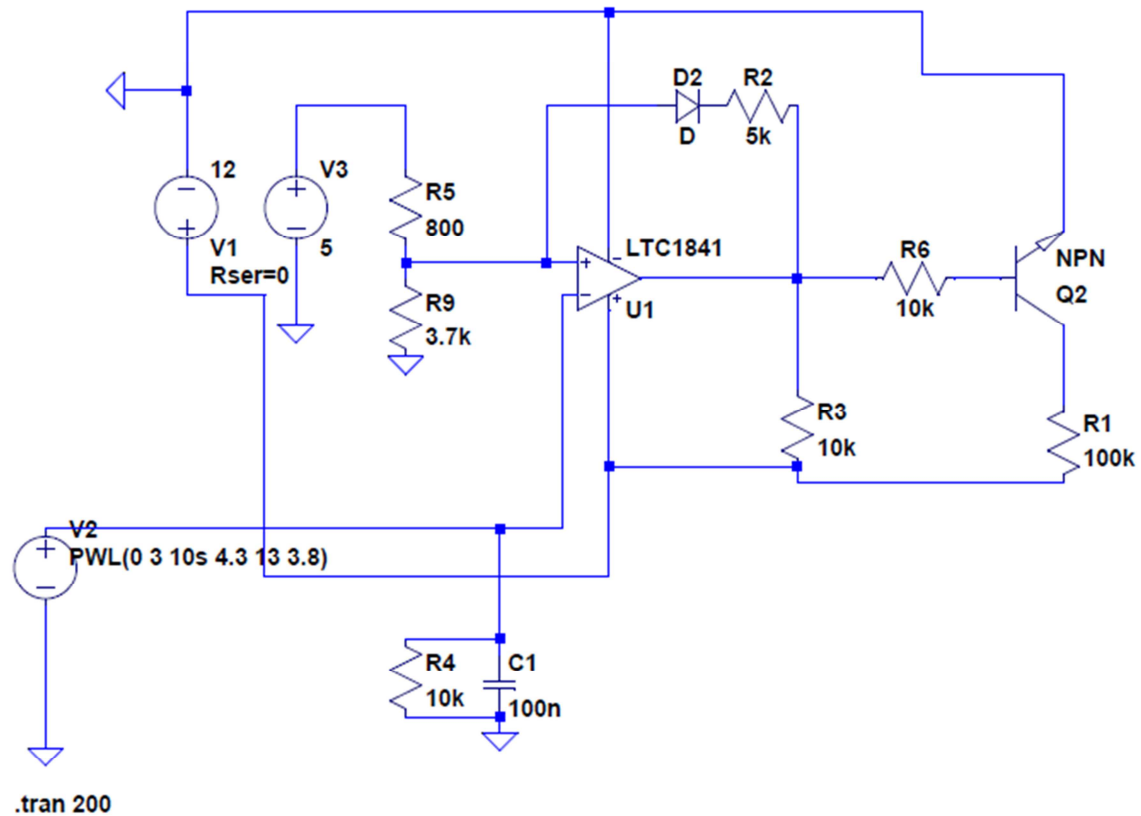


Fig. 3.14 – Circuito elettronico fronte e retro

### 3.4.1 Circuito di protezione di massima tensione

Il circuito di protezione di massima tensione deve intervenire quando la tensione supera il valore massimo consentito. Questo può accadere durante la carica della batteria. Il circuito proposto è illustrato in Fig.3.15.



- V1 = generatore principale 12V
- V2 = generatore fittizio, simulante la tensione della batteria
- V3 = regolatore di tensione 5V

Fig. 3.15 – Circuito di protezione di massima tensione

In questo circuito si nota che la logica di alimentazione dell'amplificatore (in questo caso comparatore) è la stessa del carico elettronico. Anche qui l'alimentazione a 12V viene data dal generatore ausiliario, il quale alimenta anche il regolatore di tensione che fornisce i 5 V in ingresso all'amplificatore. Di conseguenza è opportuno notare che il generatore  $V_3$  non è realmente presente ma è utilizzato a esclusivamente nella simulazione al posto del regolatore di tensione. A valle del regolatore di tensione vi è il partitore resistivo, il quale fissa la soglia di intervento del relè. In altre parole, come per il carico elettronico, tramite un trimmer si sceglie la soglia massima di intervento della protezione, variando la resistenza  $R_9$ . Mentre la batteria viene collegata al morsetto invertente dell'amplificatore. Finché tensione della batteria si mantiene al di sotto della tensione imposta sulla resistenza  $R_9$ , l'uscita dell'amplificatore si mantiene alta, una volta

che la tensione supera la soglia, l'amplificatore, commuta portando la tensione d'uscita a zero. Questo fa spegnere il BJT, togliendo l'alimentazione dall'elè. Il problema nasce appena la batteria raggiungerà la soglia di intervento, perché il relè aprirà il circuito di alimentazione, scollegando la batteria dalla carica. Una volta che la batteria non è più in carica, la corrente fornita ai suoi terminali sarà zero, e quindi quasi istantaneamente, la tensione ai capi della batteria diminuirà ritornando al di sotto della soglia imposta. In questo modo il comparatore ricommuterà la propria uscita, riportandola alta. Ma così il BJT ritornerà in conduzione e richiederà il circuito di alimentazione della batteria. Una volta richiuso la corrente continuerà a fluire nella batteria, danneggiandola e riportando di nuovo il valore di tensione ad di sopra della soglia. Ciò farà di nuovo riaprire il circuito, facendo continuamente commutare l'uscita dell'amplificatore, facendo flickerare di continuo il relè. Per questo motivo si è deciso di aggiungere un'isteresi al comparatore inserendo un diodo con in serie una resistenza. Il diodo inizialmente sarà interdettato perché la tensione in uscita dall'amplificatore sarà più elevata che all'ingresso, e quindi polarizzato inversamente. Però una volta superata la soglia, la tensione in uscita dall'amplificatore sarà zero, e farà andare in conduzione il diodo. Per questo motivo fluirà corrente nella resistenza  $R_2$ , così la soglia si abbasserà a tal punto da far restare la tensione della batteria sempre più alta della soglia mantenendo costantemente diseccitato il relè. Tutto ciò appena detto sarà validato nelle seguenti simulazioni. Nella Fig. 3.16, si vuole far notare l'andamento della tensione  $V_2$  (curva verde): si è scelta una tensione a rampa crescente da 0 V fino 4,3 V; successivamente si è deciso di far calare la tensione come una rampa decrescente, fino a raggiungere, dopo 3 secondi il valore di costante di 3,8V per il restante tempo di simulazione. La soglia di intervento, Fig. 3.16, (curva rossa) è fissata a 4,1V. Di conseguenza la tensione durante la rampa crescente dovrà far intervenire la protezione quando la  $V_2$  supera il valore di 4,1V. Infatti si nota che la soglia commuta a 4,1V, portando il suo valore a 3,7V. Nella Fig. 3.17, si nota come il valore di tensione in uscita dall'amplificatore  $V_3$  (curva blu) commuti nell'istante di superamento della soglia, e si noti come il BJT passa dallo stato di commutazione a quello di interdizione  $V_7$ (curva viola), esattamente nell'istante di superamento della soglia. Si noti inoltre che la protezione interviene esclusivamente quando la tensione supera la

soglia la prima volta, e grazie alla presenza del diodo e della resistenza, una volta che la tensione scende al di sotto della soglia di 4,1V l'amplificatore non commuta.

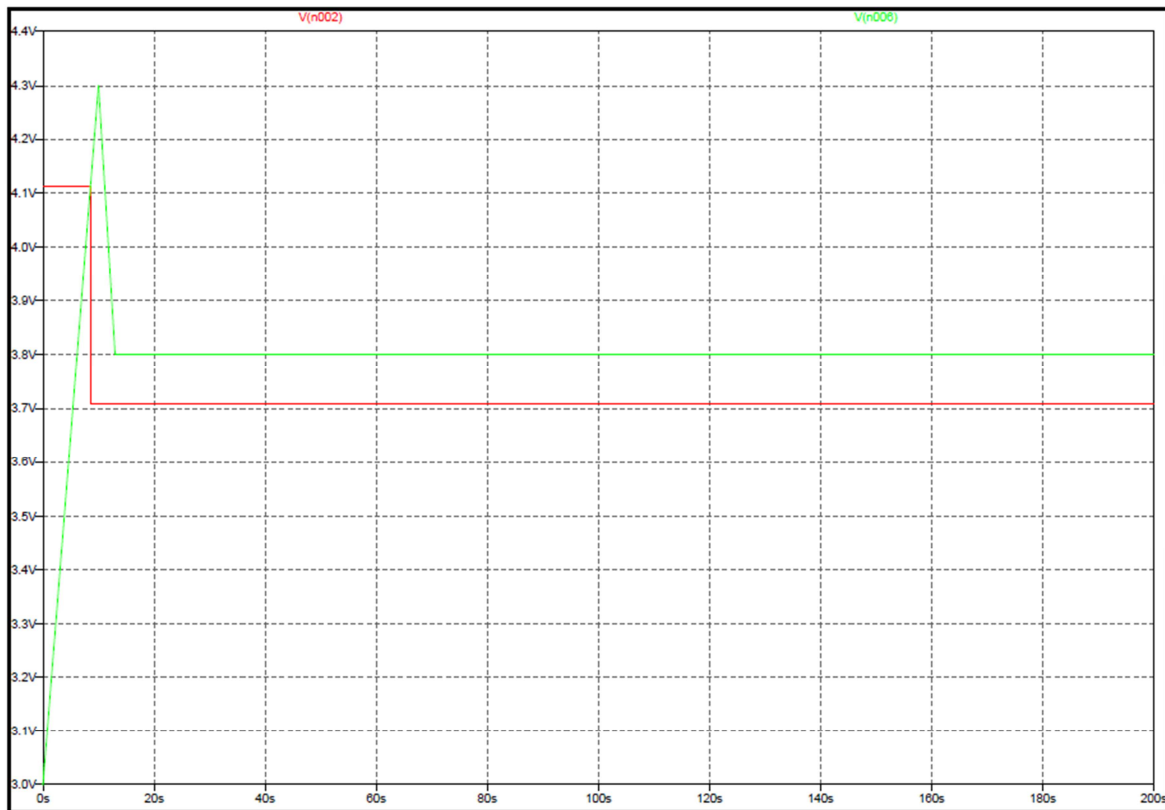


Fig. 3.16 – La curva rossa rappresenta la tensione della soglia sulla resistenza  $R_g$ ; la curva verde rappresenta la tensione simulata dal generatore  $V_2$

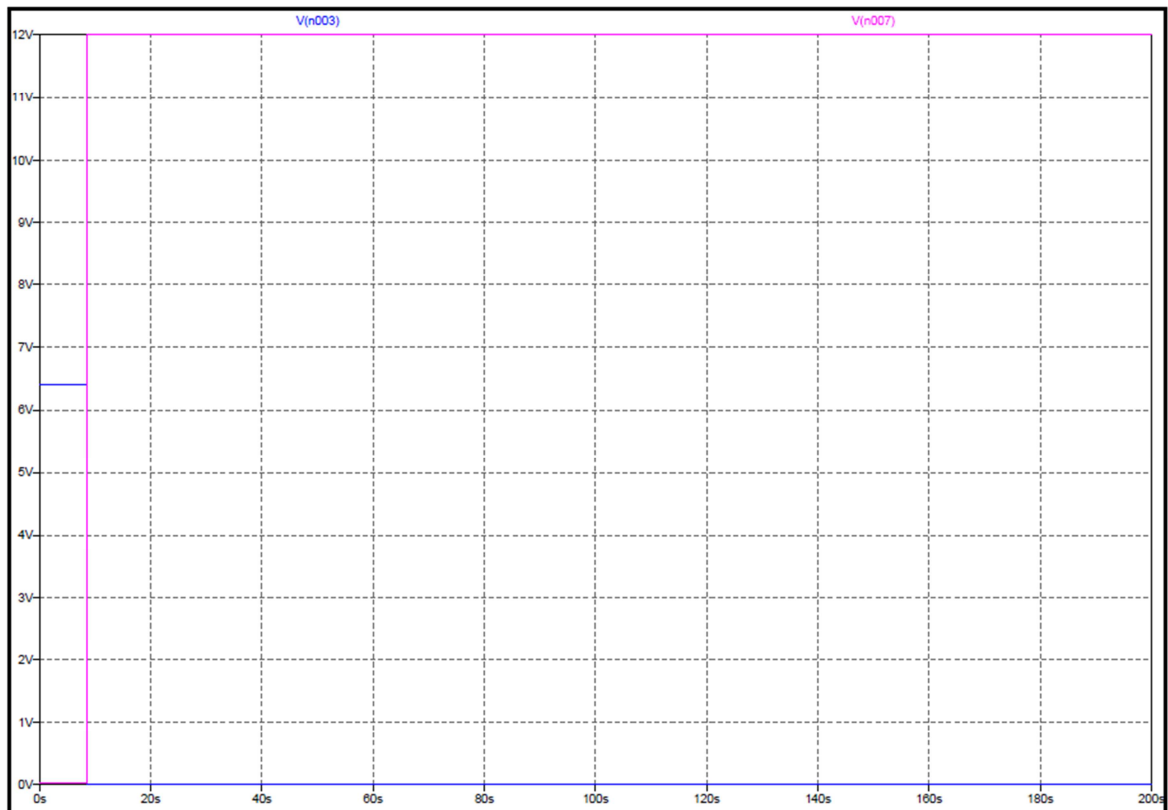
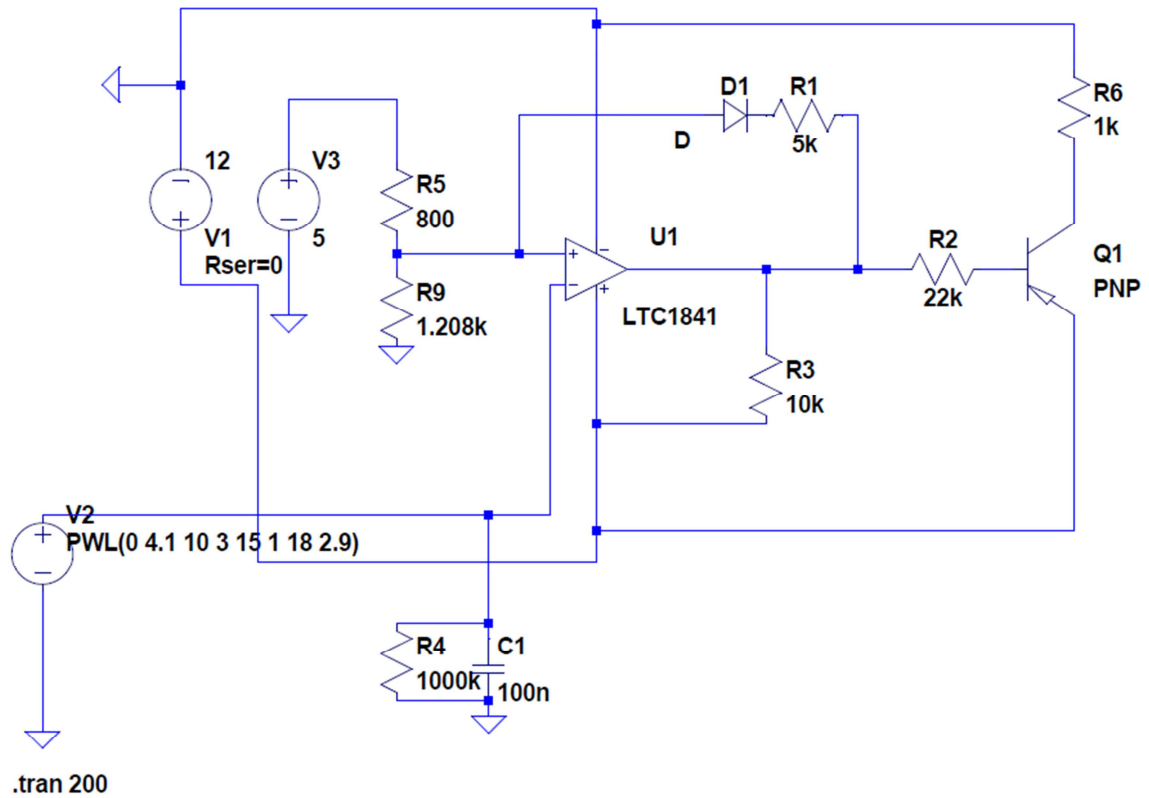


Fig. 3.17 – La curva blu rappresenta la tensione in uscita dall'amplificatore; la curva viola rappresenta la tensione sul collettore del BJT

### 3.4.2 Circuito di protezione di minima tensione

Il circuito di protezione di minima tensione viene utilizzato quando la batteria è in fase di scarica. La batteria verrà scaricata con il carico elettronico presentato nei paragrafi precedenti, e la tensione di scarica sarà l'indicatore di termine scarica, e non si vuole che esso scenda al di sotto del valore minimo consentito. Il circuito di protezione di minima tensione è rappresentato nella seguente figura, Fig. 3.18.





- V1 = generatore principale 12V
- V2 = generatore fittizio, simulante la tensione della batteria
- V3 = regolatore di tensione 5V

Fig. 3.18 – Circuito di protezione di minima tensione

La differenza con il circuito di carica è che in questo caso l'uscita dall'amplificatore sarà bassa fino a quando la tensione non scenderà al di sotto della tensione minima. Di conseguenza l'ingresso del BJT sarà basso per tutto il tempo di scarica, e per far sì che il relè sia alimentato si deve scegliere un BJT PNP. La dualità tra questo circuito e quello di carica, permette di non spiegare nel dettaglio gli andamenti delle tensioni, ma esse verranno esclusivamente riportate nelle seguenti figure, Fig. 3.19, Fig. 3.20, aggiungendo soltanto che la soglia di intervento in questa simulazione è fissata a 2.8V, mentre quella dopo l'intervento è fissata a 3V.

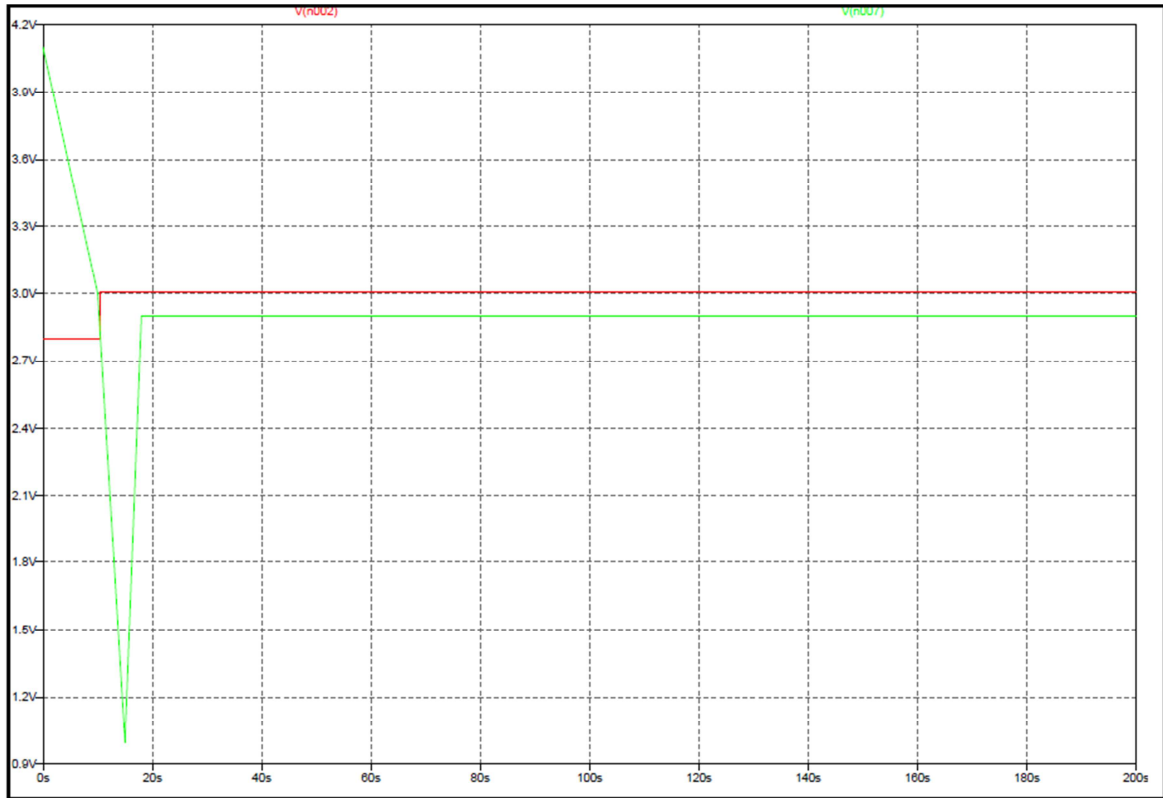


Fig. 3.19 – La curva verde rappresenta la tensione simulata dal generatore  $V_2$ ; mentre la curva rossa rappresenta la tensione della soglia sulla resistenza  $R_9$ .



Fig. 3.20 – La curva viola rappresenta la tensione sul collettore del BJT; la curva blu rappresenta la tensione in uscita dall'amplificatore

Con questa simulazione termina il capitolo di realizzazione del circuito per i test sulla batteria. Nel capitolo successivo si entrerà nel vivo dei test sulla batteria al Litio, utilizzando tutti i circuiti e tutte le definizioni date in questo capitolo.



## **4.Valutazione e simulazione del modello circuitale di una batteria al Litio**

### **4.1 Introduzione**

In questo capitolo si vorrà fare luce su molti aspetti riguardanti le batterie al litio. In particolare si vorrà parlare di come si procede nella caratterizzazione di tutti i parametri elettrici presenti in un circuito equivalente per una batteria di questo tipo. Soprattutto si vuole far notare come un circuito dettagliato sia in grado di rappresentare la risposta dinamica di una batteria al Litio. Inizialmente si vorrà mostrare come non sia semplice caratterizzare l'andamento della tensione interna della batteria, e quante prove sperimentali si devono eseguire per poterla caratterizzare. Si farà un confronto tra la tensione interna durante la carica e durante la scarica, così da mostrare una reale isteresi presente all'interno delle batterie al Litio. Così da far luce su un effetto non molto chiaro in letteratura e come si deve procedere per risolvere a questo problema. Successivamente si caratterizzeranno i parametri serie e parallelo del circuito equivalente. Anche qui si mostrerà come sia d'obbligo dover effettuare prove sperimentali per poter definire il loro valore. Queste prove saranno utili per studiare, nel capitolo successivo, un metodo di stima dello stato iniziale di carica di batterie al Litio. Lo scopo di questo capitolo non sarà confinato nelle applicazioni fino ad ora indicate, ma sarà una dimostrazione di quanto sia lungo e complicato il processo di caratterizzazione dei parametri di un modello elettrico equivalente. Quindi come un modello complicato sia utilizzabile per la simulazione di una sola batteria, e non sia affatto adattabile a simulare altre batterie al litio. Questo sarà veramente utile per l'ultimo capitolo di questa tesi, dove si dovrà procedere con la creazione di un circuito elettrico equivalente adattabile a più batterie al Litio.

### **4.2 Scelta del tipo di batteria da sottoporre alle prove sperimentali**

L'accumulatore scelto è una batteria agli Ioni di Litio, Enix Energies, Fig. 4.1, con capacità nominale pari a 6.8Ah, e con le altre caratteristiche tecniche indicate nella successiva tabella, Fig. 4.2.



Fig. 4.1 – Batteria Li-Ion

	VALORE NOMINALE	VALORE MINIMO	VALORE MASSIMO
CORRENTE DI CARICA [A]	3,1	0,15	5,0
TENSIONE DI CARICA [V]	4,2	4,1	4,25
TEMPERATURA DI CARICA [°C]	+20	0	+40
CORRENTE DI SCARICA	--	--	5,0
TENSIONE DI CUT-OFF [V]	2,8	2,7	3,0
TEMPERATURA DI SCARICA [°C]	+20	-10	+60

Fig. 4.2 – Caratteristiche della batteria presenti sul Datasheet

La batteria è predisposta di una protezione interna che interviene per correnti superiori a 5A. Un ultimo fatto da discutere riguarda i limiti di corrente e tensione, essi hanno un valore nominale, un valore massimo ed uno minimo. Questo è importante perché

garantisce alla batteria una certa flessibilità sui limiti in tensione e corrente applicabili senza che essa si danneggi.

### 4.3 Prove sperimentali per la valutazione dei parametri circuitali

Una batteria al Litio può essere descritta con un circuito equivalente. Nel capitolo precedente sono stati elencati ampiamente tutti i modelli circuitali possibili per descrivere il comportamento di una batteria al Litio. Come prima cosa bisogna inquadrare lo scopo dell'utilizzo del circuito equivalente. Esso verrà utilizzato per stimare lo stato di carica tramite la tecnica di osservazione della tensione di circuito aperto. Mentre, successivamente verrà utilizzato per studiare la gestione della carica dei veicoli elettrici. Queste due applicazioni richiedono l'utilizzo di circuiti elettrici differenti. Quando lo scopo è studiare una tecnica di stima dello stato di carica, il circuito equivalente deve possedere una capacità di risposta anche ai transitori; mentre l'utilizzo per la gestione della carica di più veicoli elettrici permette di utilizzare un circuito adatto esclusivamente per valutare la risposta a regime. Quindi bisogna procedere nella scelta del circuito più complicato e, se necessario, eseguire delle semplificazioni successive. Il circuito scelto è il modello DP – Dual Polarization, Fig. 4.3, già dettagliatamente spiegato nei paragrafi precedenti. Si passa ora a dettagliare i metodi utilizzati per stimare tutti i parametri del circuito.

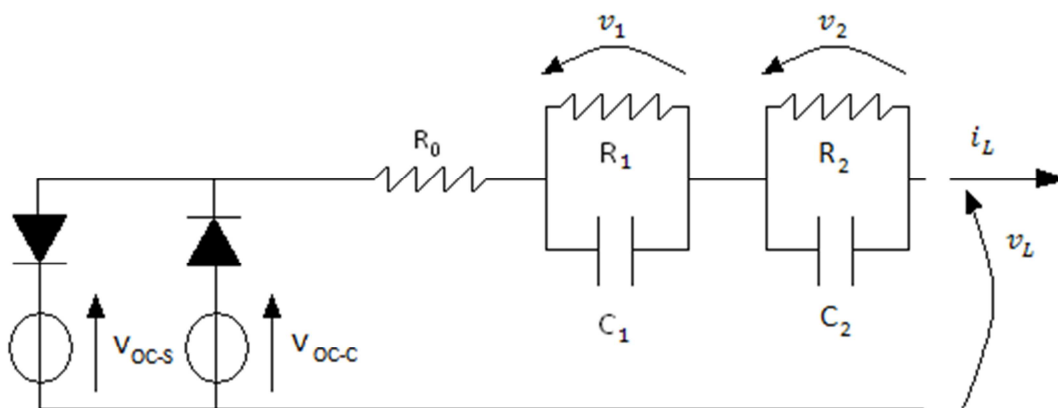


Fig. 4.3 – Modello DP – Dual Polarization

### 4.3.1 Valutazione tensione di circuito aperto

Il primo passo è valutare la tensione di circuito aperto di scarica  $V_{OC-S}$  e la tensione di circuito aperto di carica  $V_{OC-C}$ . Per procedere a valutarle, si devono effettuare delle prove sperimentali di carica e scarica un po' particolari. Lo scopo è trovare la funzione che lega l'andamento della tensione interna della batteria, depurata da tutte le perdite rappresentate sugli elementi serie, in funzione dello stato di carica, e quindi in funzione della corrente. Come già detto precedentemente, è probabile che le batteria al Litio soffrano del fenomeno dell'isteresi interna. Per questo motivo è doveroso considerare inizialmente la tensione interna di carica differente dalla tensione interna di scarica. Non conoscendo inizialmente lo stato di carica presente nella batteria si è voluto procedere con una carica completa della batteria. In tutte le prove effettuate d'ora in poi la carica della batteria sarà ritenuta completa quando essa raggiungerà la tensione massima applicabile ai suoi terminali. In altre parole durante la fase di carica della batteria non si applicherà la fase a tensione impressa successivamente alla fase a corrente impressa. In più le fasi di carica e scarica per la caratterizzazione della tensione interna della batteria verranno eseguite con la corrente standard pari a 3,1A, valore dichiarato sul Datasheet. Successivamente alla carica iniziale si sono effettuate una serie di prove di carica e di scarica per capire quanta carica si riesce ad estrarre, ed fornire, una corrente standard.



## SCARICA STANDARD 3,1A

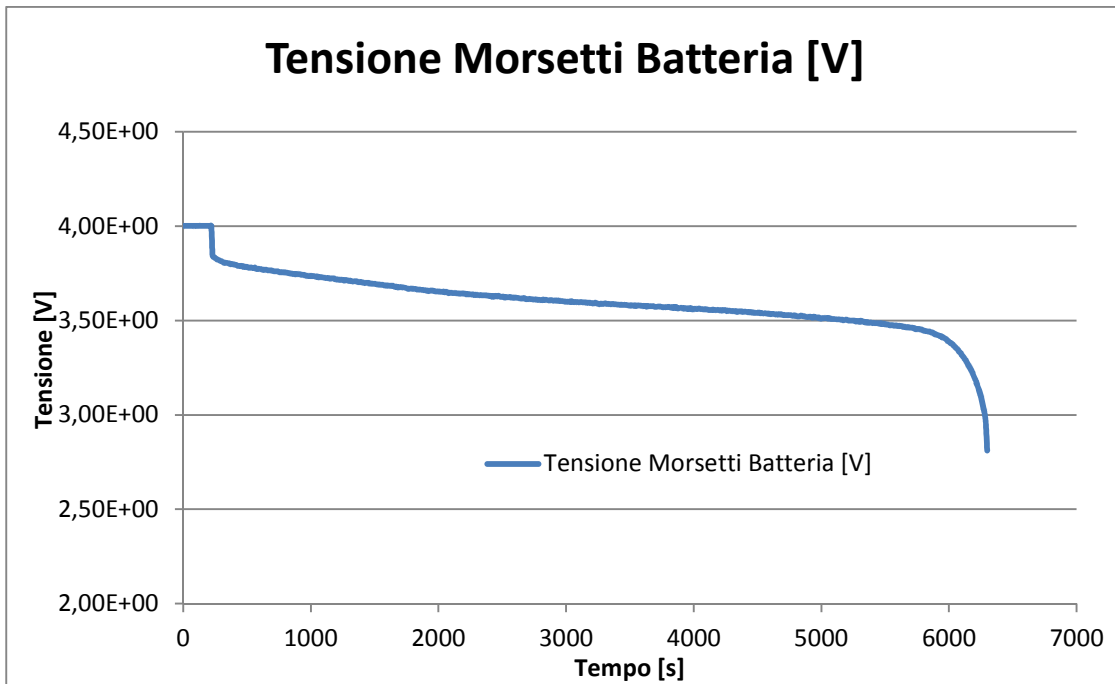


Fig. 4.4 – Scarica standard con una corrente di 3,1A; tensione ai capi della batteria in Volt, in funzione del tempo espresso in secondi

## CARICA STANDARD 3,1A

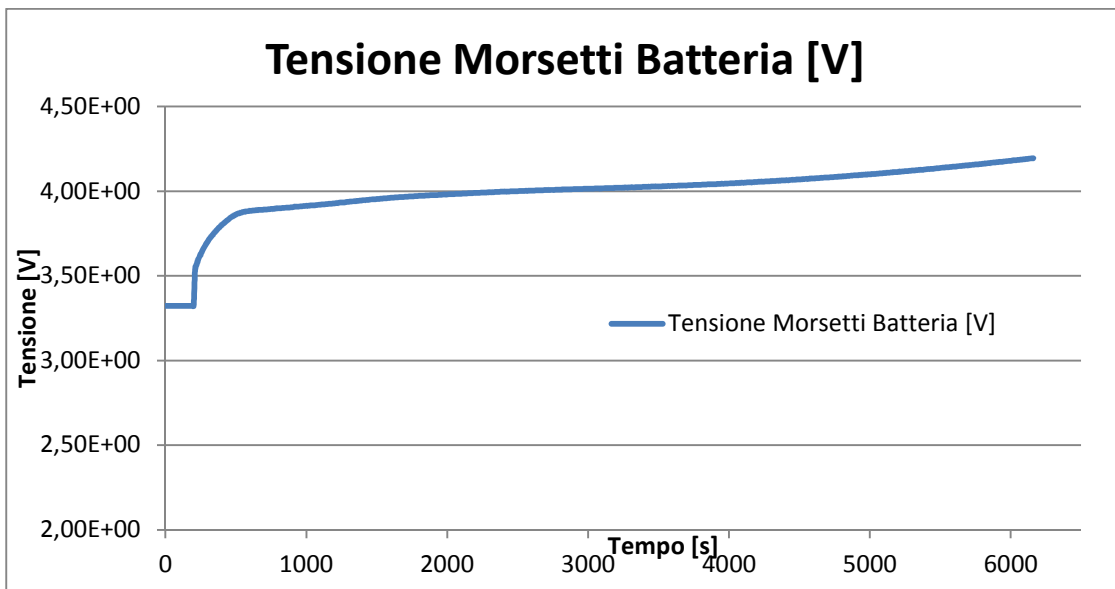


Fig. 4.5 – Carica standard con una corrente di 3,1A; tensione ai capi della batteria in Volt, in funzione del tempo espresso in secondi

Le due prove indicate in Fig. 4.4, Fig. 4.5, sono state essenziali e di enorme importanza perché grazie a queste si riesce a definire quanta carica si riesce ad imprimere applicando il solo tratto a tensione costante. Il tempo in cui è stata impressa una corrente costante è stato pari a 6080 secondi. Quindi con una corrente di 3.1A, la capacità estratta dalla batteria è stata di 5,23 Ah, quindi il 77% del SOC. Si devono ora effettuare le prove di carica e scarica valutando la tensione interna della batteria. Verranno eseguite prove impulsive di corrente. Si inizierà dalla batteria carica con le stesse modalità indicate in Fig. 4.5, e si imporrà il carico a corrente standard 3,1A per step di 5 min. In altre parole di estrarrà una carica per ogni periodo pari a 0,26Ah. Al termine dei 5 minuti, dove la batteria era connessa al carico, verrà disconnessa così da interrompere la corrente e valutare, dopo 15 minuti, la tensione interna della batteria. Cioè quel valore di tensione depurato da tutti i transitori interni. La prova continuerà fino a quando la tensione ai capi della batteria non raggiungerà il suo valore minimo pari a 2,8V. In Fig. 4.6, si può notare l'andamento della tensione ai terminali della batteria, mentre in Fig. 4.7, l'andamento della corrente.

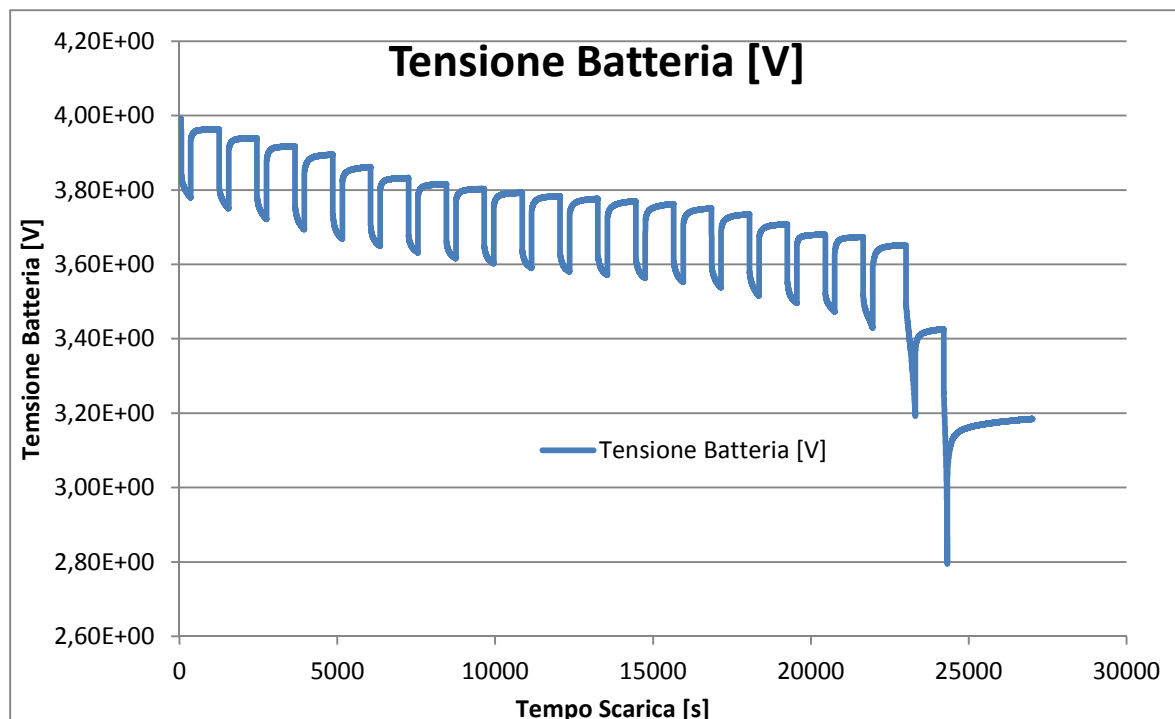


Fig. 4.6 – Andamento impulsivo della tensione della batteria [V], durante la scarica, in funzione del tempo [s], con una corrente standard di 3,1A

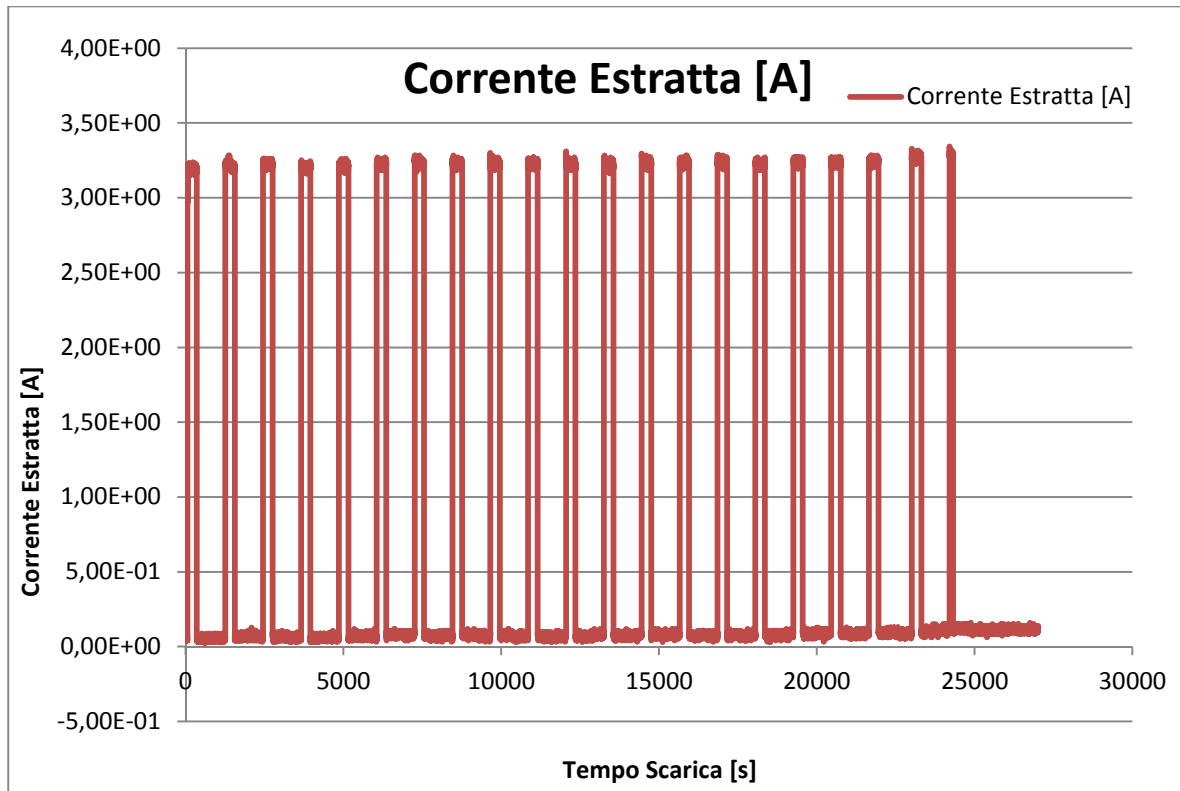


Fig. 4.7 – Andamento impulsivo della corrente [A], durante la scarica, in funzione del tempo [s]

Come si può notare dal grafico rappresentato in Fig. 4.6, la valutazione della tensione interna della batteria non può essere considerata esaustiva, con una prova di questo tipo. Questo perché nel tratto finale di scarica, la tensione crolla molto velocemente, e con passi di valutazione ogni 5 minuti, con 3,1A, vi sono un numero di punti di campionamento irrilevanti nell'ultimo tratto. Per questo motivo si è scelto di campionare la parte finale della scarica estraendo carica per 1 minuto con 1 A, ed aspettando per 15 minuti il raggiungimento del valore di tensione interna. Il risultato trovato per l'ultimo tratto di scarica, è rappresentato nella seguente figura, Fig. 4.8.

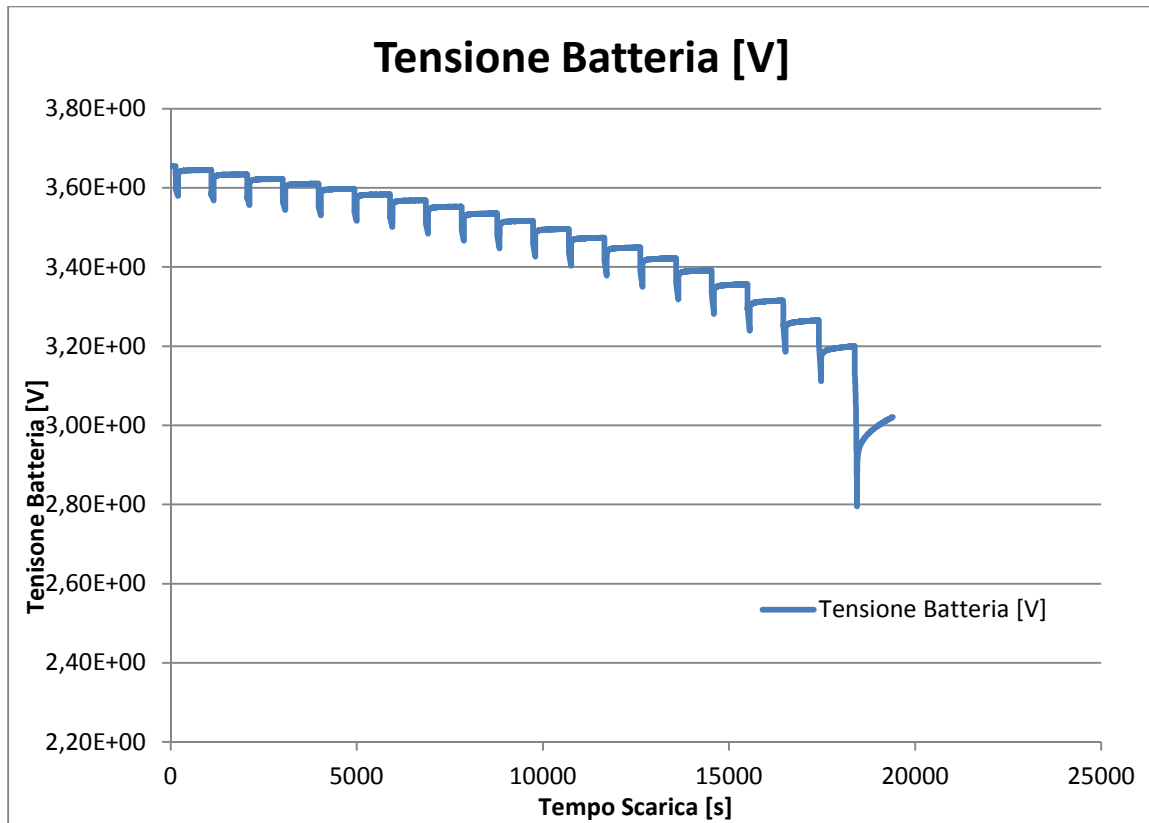


Fig. 4.8 – Andamento impulsivo della tensione della batteria [V], durante la scarica, in funzione del tempo [s], con una corrente di 1A

Una volta trovati questi valori di tensione interna della batteria, vanno graficati per rappresentare l'andamento della tensione di circuito aperto completa, in funzione della profondità di scarica, Fig. 4.9. Per passare dal tempo alla profondità di scarica è stato solo moltiplicato il tempo per la corrente, perché in entrambe le prove la corrente era fissata e costante.

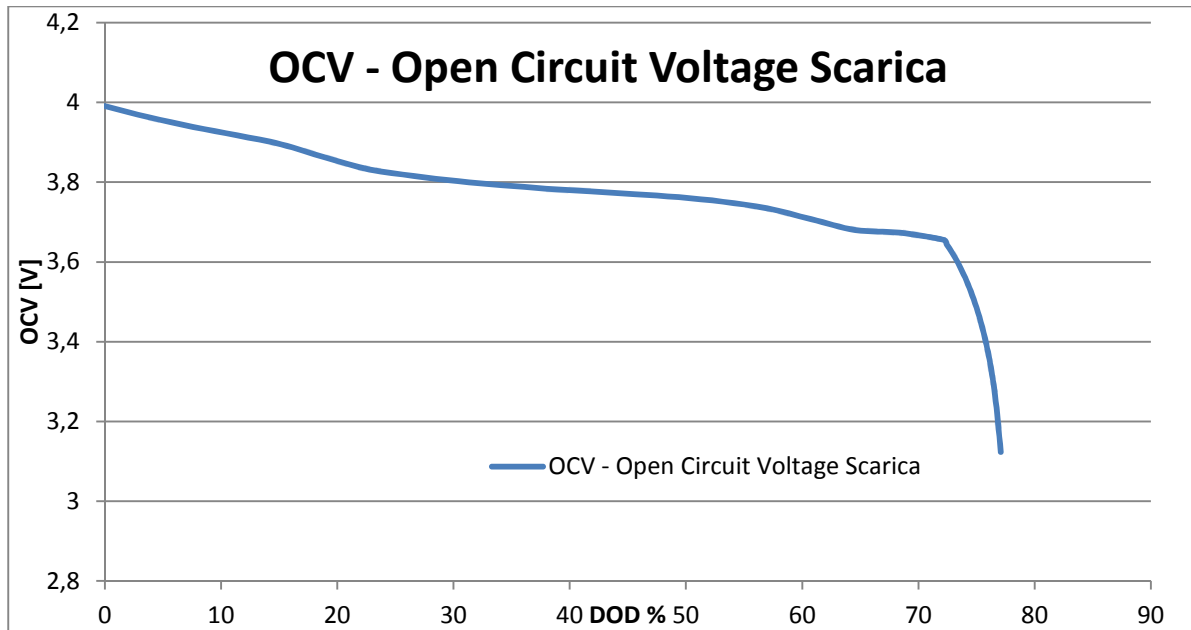


Fig. 4.9 – Andamento della tensione di circuito aperto OCV [V], in funzione dello stato di carica

Come si può facilmente notare, la tensione di circuito aperto non arriverà mai a raggiungere la tensione massima e la tensione minima. Questo perché applicando una qualunque corrente in carica ed in scarica, provocherebbe una caduta di tensione sui parametri serie, e ciò farebbe raggiungere il valore massimo o minimo di tensione ai terminali della batteria (a valle dei parametri serie) sicuramente prima che la tensione di circuito aperto possa raggiungere tali valori di soglia. Per questo motivo successivamente si spiegherà come stimare il restante andamento di tensione di circuito aperto. Dualmente, come appena descritto per la scarica, verrà testato per la carica. Di conseguenza, anche per la carica, si effettueranno prove impulsive, estraendo intervalli di carica con una corrente di 3,1 A per 5 minuti e si attenderà 15 minuti, dopo ogni intervallo, per il raggiungimento della tensione di circuito aperto. Nelle seguenti figure, Fig. 4.10, Fig. 4.11, si vogliono illustrare rispettivamente gli andamenti della tensione e della corrente, durante le prove impulsive di carica a 3,1A.

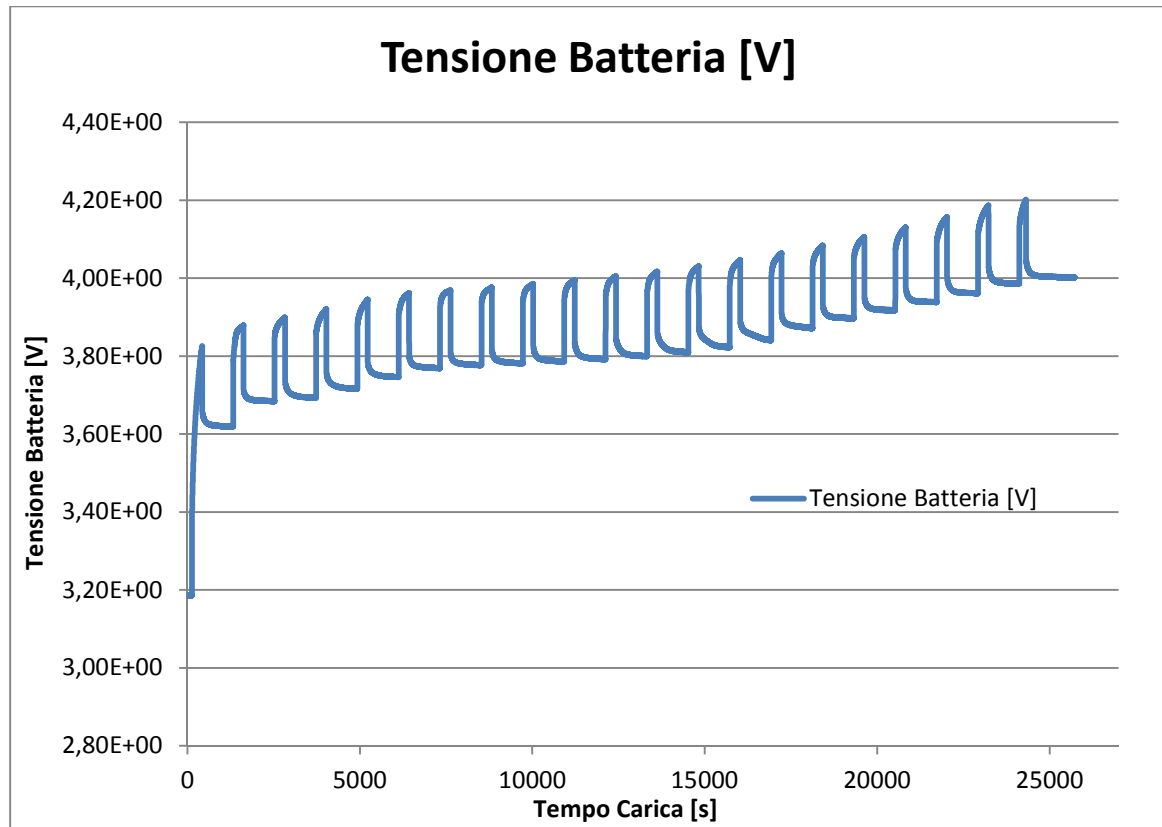


Fig. 4.10 – Andamento impulsivo della tensione della batteria [v], durante la carica, in funzione del tempo [s], con una corrente standard 3,1A

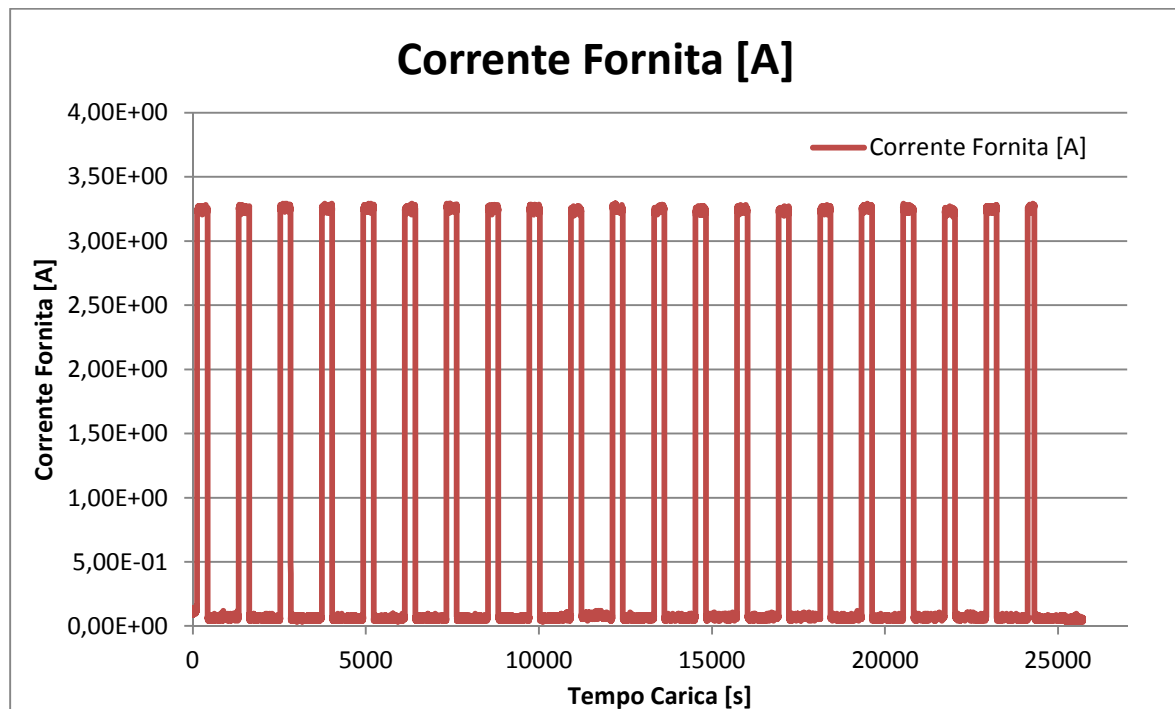


Fig. 4.11 – Andamento impulsivo della corrente [A], rispetto al tempo [s]

Durante la carica si presenta il problema duale rispetto a quello riscontrato durante la valutazione della tensione di circuito aperto in scarica. Nel tratto iniziale di carica, la tensione cresce in modo vertiginoso, quindi un campionamento impulsivo, ogni 5 secondi, è insufficiente. La soluzione a questo problema è la valutazione della corrente con passi impulsivi più piccoli. Si è scelto di effettuare una valutazione della tensione interna estraendo dalla batteria una corrente pari ad 1 A per 60 secondi, aspettando, dopo questo periodo, un tempo sempre pari a 15 minuti. Si è deciso di interrompere questa prova quando la tensione di circuito aperto raggiungeva un valore pari a 3,6 V. Si è scelto un valore pari a 3,6 V, perché dopo quel valore la tensione interna inizia a diminuire la propria crescita entrando nella zona di tensione più piatta. Gli andamenti di questa prova sono illustrati in Fig. 4.12.

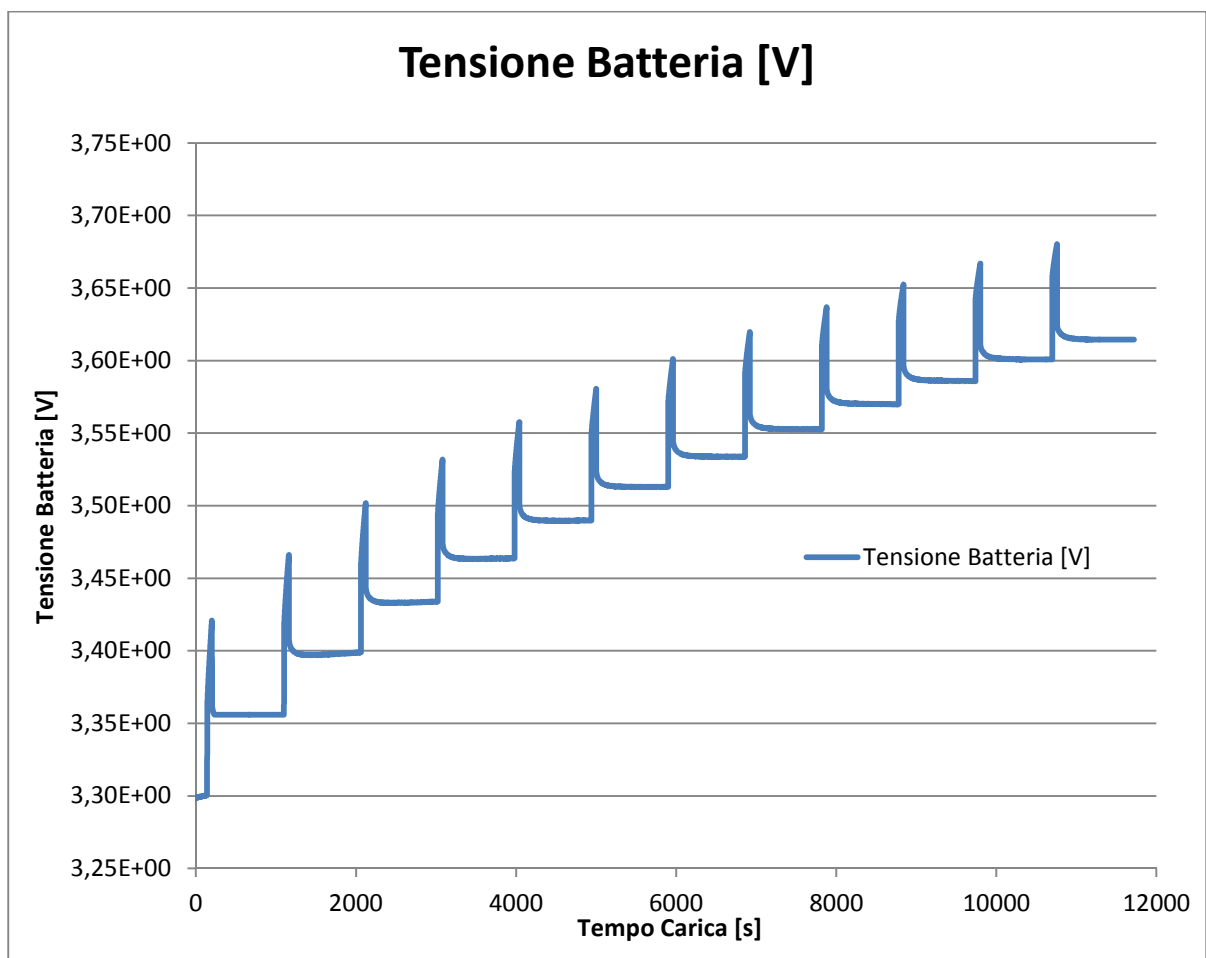


Fig. 4.12 – Andamento impulsivo della tensione della batteria [V], durante la carica, in funzione del tempo [s], con una corrente di 1A

Si passa ora a graficare, come si è fatto per la scarica, la tensione di circuito aperto totale, in funzione dello stato di carica, Fig. 4.13. Si nota immediatamente, come un campionamento così accurato crea una funzione che approssima discretamente l'andamento della tensione interna della batteria.

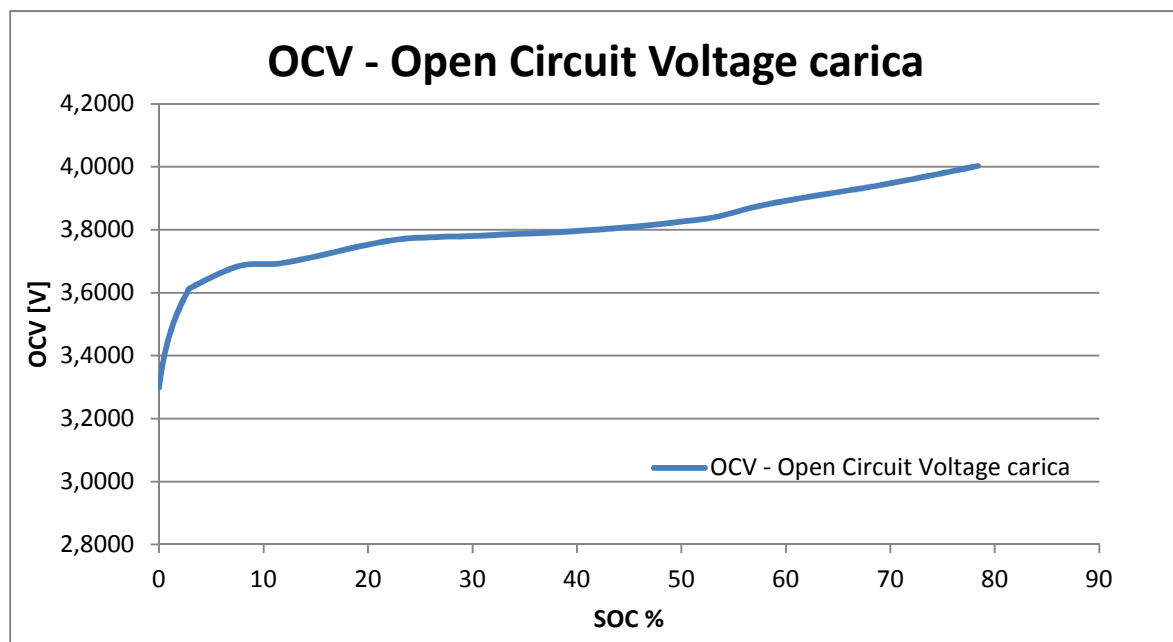


Fig. 4.13 – Andamento della tensione di circuito aperto OCV [V], in funzione dello stato di carica

Una volta caratterizzata la tensione di circuito aperto si deve modellizzare la funzione polinomiale che gestisce il generatore di tensione del modello circuitale. Per far ciò si deve capire se la batteria risente del fenomeno di isteresi interna, e quindi scegliere se rappresentare il circuito con un generatore di tensione oppure con due generatori, come spiegato nei capitoli precedenti. Come prima cosa si devono confrontare le curve di tensione interna durante la carica e la scarica, Fig. 4.14.



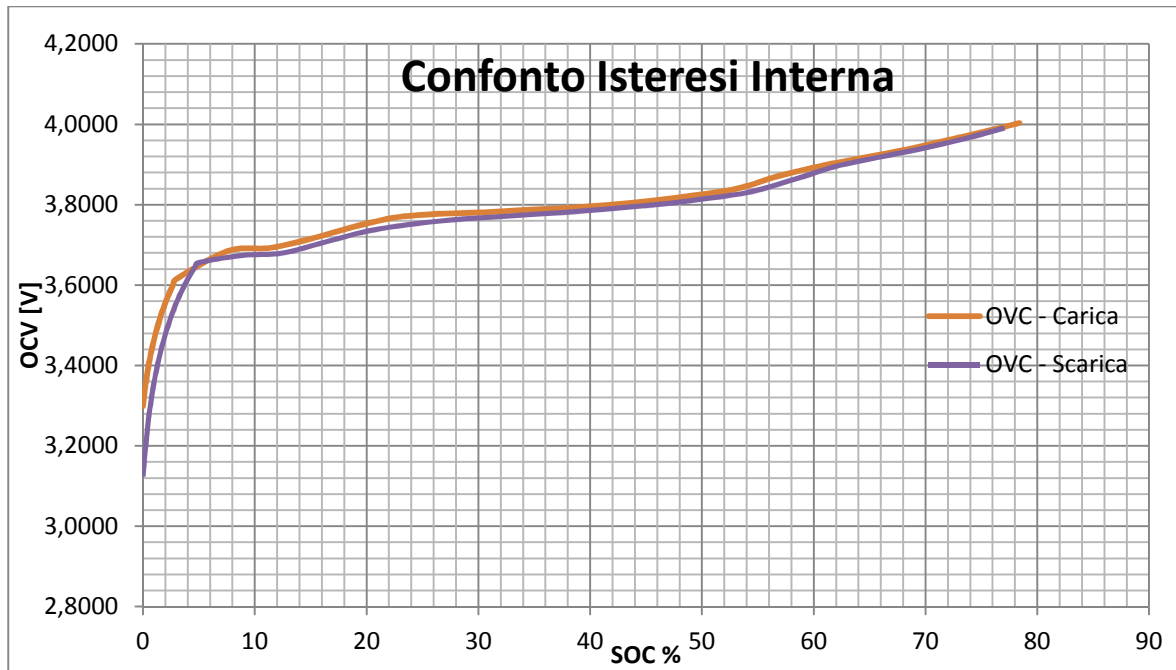


Fig. 4.14 – Confronto isteresi interna della batteria

Come illustrato la batteria risente di una piccola isteresi interna. Per definire la funzione polinomiale che simulerà l'andamento della tensione in funzione dello stato di carica. Quindi può procedere il più modi:

- Si può scegliere solo una delle due funzioni OCV, nei casi in cui il circuito venga utilizzato soltanto per descrivere o la scarica o la carica. Quindi si sceglierà la sola funzione che dovrà descrivere.
- Si può fare una media punto per punto e definire una funzione intermedia tra le due;
- Si considerano entrambe le curve di carica e scarica, modellizzando il circuito con due generatori uno per la carica, ed l'altro per la scarica.

Si è deciso di procedere scegliendo una sola curva OCV, più precisamente quella di scarica. Si è scelta questa curva perché, per i test sulla stima dello stato iniziale di carica, verrà valutata su numerose scariche a correnti differenti, e quindi è più utile utilizzare la tensione interna di scarica. Come si può notare la OCV di scarica ha un valore minimo ed un valore massimo diversi dai valori di soglia dichiarati precedentemente a 4,2V ed a 2,8V. Questo perché per valutare la tensione bisogna estrarre della carica e quindi si deve

estrarre una corrente. La corrente provoca una caduta di tensione sui parametri serie del circuito e quindi la tensione ai morsetti della batteria raggiungerà prima le soglie della tensione interna. Quindi anche se si dovesse applicare una corrente bassa non si riuscirebbe a valutare la tensione interna della batteria dal suo valore minimo al suo valore massimo. Una soluzione a questo problema è stimare l'andamento della curva così da poter valutare i restanti valori di OCV. Come si può notare dalla Fig. 4.14 inizialmente la tensione cresce molto velocemente, e quindi il raggiungimento della soglia pari a 2,8V è quasi istantaneo mentre l'andamento verso i 4,2V è più lento. Con l'ausilio di MATLAB, più in particolare con lo strumento "cftool" si è voluto procedere con la stima della tensione nella parte iniziale e finale tramite un interpolatore "cubic spline". La curva completa di circuito aperto è rappresentata nella seguente figura, Fig. 4.15.

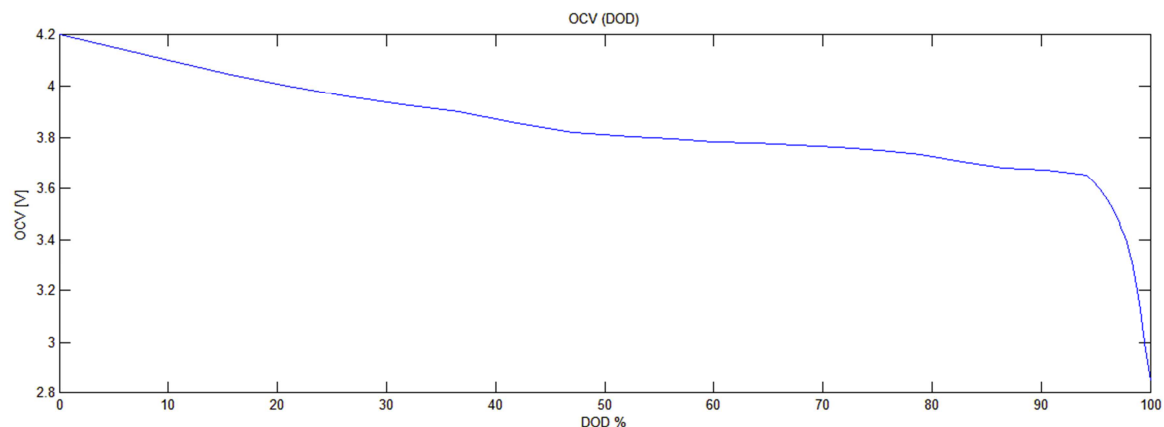


Fig. 4.15 – Andamento della tensione di circuito aperto in funzione della profondità di scarica, dallo 0% al 100%

Il passaggio successivo sta nella scelta della funzione che meglio approssima l'andamento della OCV in funzione della DOD. Come già detto in precedenza, l'andamento della tensione di circuito aperto è approssimabile tramite una funzione polinomiale. Si è scelto una polinomiale di tredicesimo grado, così da approssimare al meglio la funzione reale. Il polinomio di tredicesimo ordine è il seguente:

$$\text{OCV\_STIMATA} = -727.386176282766e-024 * \text{SOC}^{13} + 423.294260312165e-021 * \text{SOC}^{12} +$$

$$\begin{aligned}
& -108.561804292701e-018*\text{SOC}^{11}+16.1572642301325e-015*\text{SOC}^{10}+ \\
& -1.54777969678643e-012*\text{SOC}^9+100.211723100232e-012*\text{SOC}^8+ \\
& -4.49163648714494e-009*\text{SOC}^7+140.774545470178e-009*\text{SOC}^6+ \\
& -3.07958267317277e-006*\text{SOC}^5+45.9755715941338e-006*\text{SOC}^4+ \\
& -437.009775382644e-006*\text{SOC}^3+2.29318927224042e-003*\text{SOC}^2+ \\
& -14.7059572261504e-003*\text{SOC}+ 4.20002911758777
\end{aligned}$$

Il confronto tra la funzione stimata dal polinomio e la funzione reale è mostrato nella seguente illustrazione, Fig. 4.16.

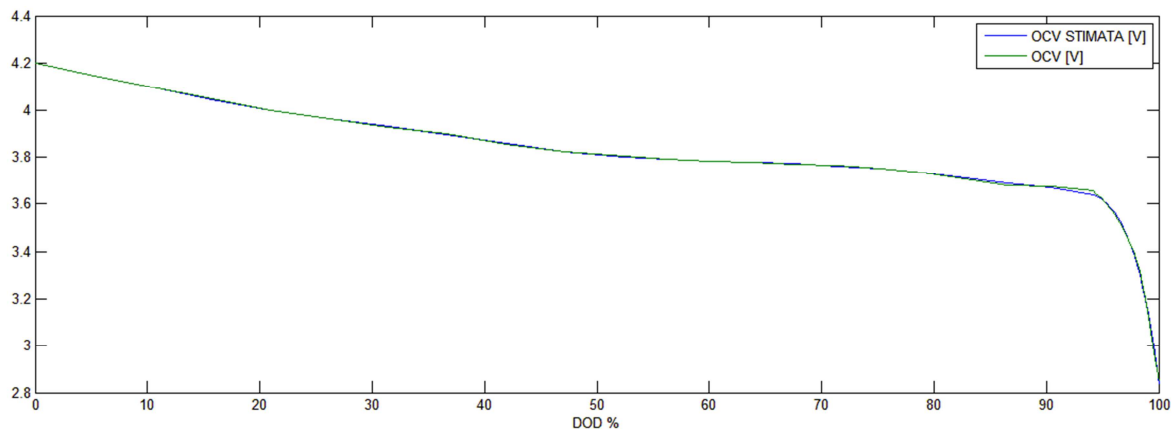


Fig. 4.16 – Confronto tra la tensione di circuito aperto, risultante dalla funzione polinomiale, e la tensione di circuito aperto reale

Riassumendo i passaggi eseguiti, si è scelto di modellizzare l'andamento della tensione interna della batteria tramite un unico generatore di tensione, il quale in funzione della corrente richiesta farà variare la tensione ai suoi morsetti come un polinomio di tredicesimo grado. Nel prossimo paragrafo si vuole spiegare come scegliere correttamente i parametri serie e parallelo che compongono il circuito equivalente.

### 4.3.2 Valutazione dei parametri serie e parallelo

Come già ampiamente spiegato nei capitoli precedenti, si deve scegliere la complessità del circuito in funzione dell'utilizzo che deve essere fatto. In questa trattazione il circuito equivalente deve essere in grado di simulare dei test impulsivi, per verificare la presenza

di correlazione tra la tensione interna e lo stato di carica, varando la corrente di scarica. Si è scelto di omettere la modellizzazione dell'autoscarica e dell'invecchiamento della batteria, perché irrilevanti per uno studio di questo tipo. Il modello avrà di conseguenza il circuito equivalente con i soli parametri serie, quindi resistenze e condensatori. Si è scelto di utilizzare il circuito equivalente DP, e non l'equivalente di Thevenin. La spiegazione della scelta sta nella risposta del circuito a sollecitazioni dinamiche: le prove sperimentali successive saranno formate da molteplici transitori, dovuti all'apertura ed alla chiusura del circuito e quindi è doverosa una risposta ai transitori la più perfetta possibile. Comunque per completezza successivamente si effettuerà un confronto tra una risposta di un circuito DP e di un circuito equivalente di Thevenin. Per valutare i parametri circuitali si è deciso di interrompere bruscamente una usuale scarica, valutando nel dettaglio il comportamento della tensione ai morsetti della batteria, Fig. 4.17.

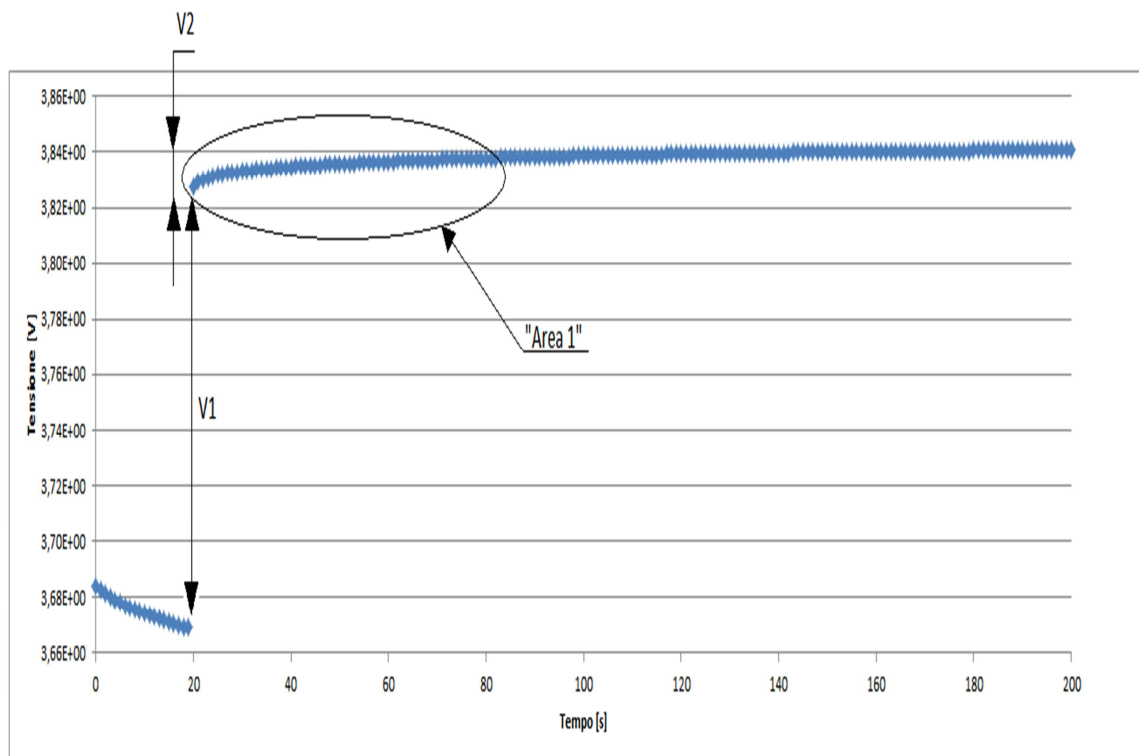


Fig. 4.17 – Prova di apertura per la valutazione dei parametri circuitali di un modello DP, con una corrente di scarica pari a 3,1A

La scarica che si è voluta interrompere è stata effettuata con una corrente standard pari a 3,1A. Grazie al valore noto e costante di corrente si è facilmente in grado di conoscere la

resistenza interna della batteria; quel parametro che nel circuito equivalente, di Fig. 4.3, è stato chiamato  $R_0$ . Il valore di  $R_0$  si ricava osservando la caduta di tensione che si provoca istantaneamente dopo l'apertura del circuito; questo valore nel grafico in Fig.4.17, è pari a  $V_1=158,42$  mV. Conoscendo la tensione  $V_1$  e la corrente che si stava applicando durante la scarica  $I_s$ , si trova immediatamente il valore di resistenza:

$$R_0 = \frac{V_1}{I_s} = 51,10 \text{ m}\Omega$$

Per calcolare i restanti parametri del circuito il calcolo non è così immediato, perché si devono trovare le costanti di tempo che approssimano il transitorio di scarica dei condensatori. Per far ciò si deve analizzare nel dettaglio l'andamento della tensione nella zona indicata come "Area 1" nel grafico in Fig. 4.17, e successivamente trovare i parametri costituenti la funzione in grado di approssimare l'andamento della tensione. In questo momento entra fortemente in gioco la scelta del circuito equivalente. Si è scelto un modello circuitale di tipo DP, il quale ha due coppie di condensatori in parallelo a resistenze. Ciò ci permette di affermare che il circuito avrà due costanti di tempo una per ogni coppia R-C. Per trovare le costanti di tempo e di conseguenza i parametri delle coppie R-C, si è deciso di utilizzare Matlab approssimando la curva rappresentata nell'Area 1, con una funzione con due costanti di tempo, e confrontando la funzione trovata con l'equazione che risolve il circuito. Si vuole esprimere l'equazione nel dominio di Laplace che risolve il circuito DP:

$$V_S(S) = I_S(S) \left( R_0 + \frac{\left(\frac{R_1}{SC_1}\right)}{R_1 + \left(\frac{1}{SC_1}\right)} + \frac{\left(\frac{R_2}{SC_2}\right)}{R_2 + \left(\frac{1}{SC_2}\right)} \right)$$

La soluzione dell'equazione nel tempo è la seguente:

$$v_S(t) = i_S(t) \left( R_0 + R_1(1 - e^{(-\frac{t}{\tau_1})}) + R_2(1 - e^{(-\frac{t}{\tau_2})}) \right)$$

Si vuole ora mostrare il focus della parte denominata “Area 1” e la funzione con due costanti di tempo che approssima l’andamento di questa curva, Fig. 4.18.

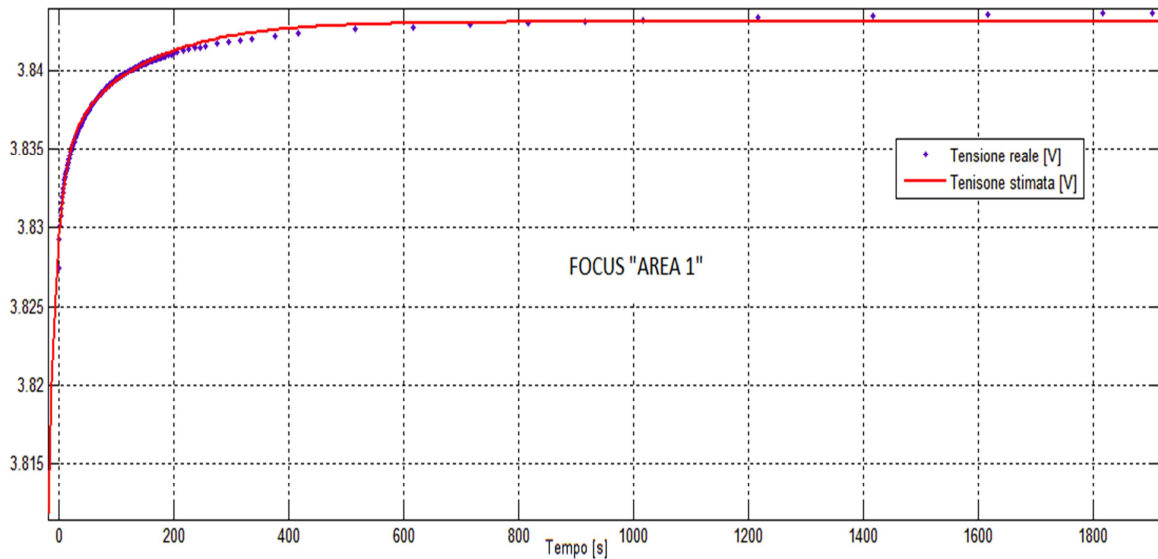


Fig. 4.18 – Andamento della zona denominata “Area 1” e della funzione che approssima l’andamento reale

Nella Fig. 4.18, l’andamento della tensione stimata, è descritta con la seguente funzione:

$$y(x) = a * (1 - \exp(-bx)) + c * (1 - \exp(-dx))$$

Dove:

- $a = 0.006844$
- $b = 0.1239$
- $c = 0.008606$
- $d = 0.008658$

Ora si deve effettuare l’equivalenza tra i parametri dell’equazione  $y(x)$  e dell’equazione risolutiva del circuito  $v_s(t)$ . Dall’equazione  $v_s(t)$ , si deve eliminare il termine che esprima la caduta di tensione sulla resistenza  $R_0$ . Questo perché la valutazione della caduta di tensione è già stata effettuata nel punto precedente, infatti il focus è stato effettuato esclusivamente sul tratto “Area 1”. Grazie all’uguaglianza tra le due funzioni si possono

trovare i valori delle due costanti di tempo  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  e di conseguenza ricavare i valori di  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ :

- $\tau_1 = 8.0710$  s
- $\tau_2 = 115.5001$  s
- $R_1 = 2.4479$  m $\Omega$
- $C_1 = 3.2971$  kF
- $R_2 = 2.7761$  m $\Omega$
- $C_2 = 41.6052$  kF

I valori trovati sono da inserire nel circuito equivalente. Questi calcoli permettono di valutare nel corretto modo il circuito equivalente di una batteria al Litio. Ricapitolando il circuito presentato avrà due coppie di resistori e condensatori, quindi grazie ad un circuito di questo tipo si raggiunge una ottima precisione dinamica. Un circuito di questo tipo è utilizzabile anche per applicazioni in real time, come per il battery management system. Successivamente si vuole fare un confronto su l'utilizzo di un duale circuito usando il modello equivalente di Thevenin, quindi un circuito con una sola costante di tempo. Analizzando di nuovo la Fig. 4.18 si possono valutare i parametri circuitali, per il modello di Thevenin. Esso avrà la resistenza  $R_0$  ed il blocco  $R_1$  e  $C_1$ .  $R_0$  avrà lo stesso valore del modello DP, mentre il blocco  $R_1$  e  $C_1$  ha i seguenti valori:

- $R_1 = 5.2240$  m $\Omega$
- $C_1 = 22.971$  kF

È doveroso effettuare il confronto grafico della risposta dinamica del circuito DP, e del circuito con modello equivalente di Thevenin, per capire le approssimazioni che possono scaturire nel caso si utilizzasse un circuito più o meno complicato. Il confronto visivo si può notare nella seguente figura, Fig. 4.19 e Fig. 4.20.

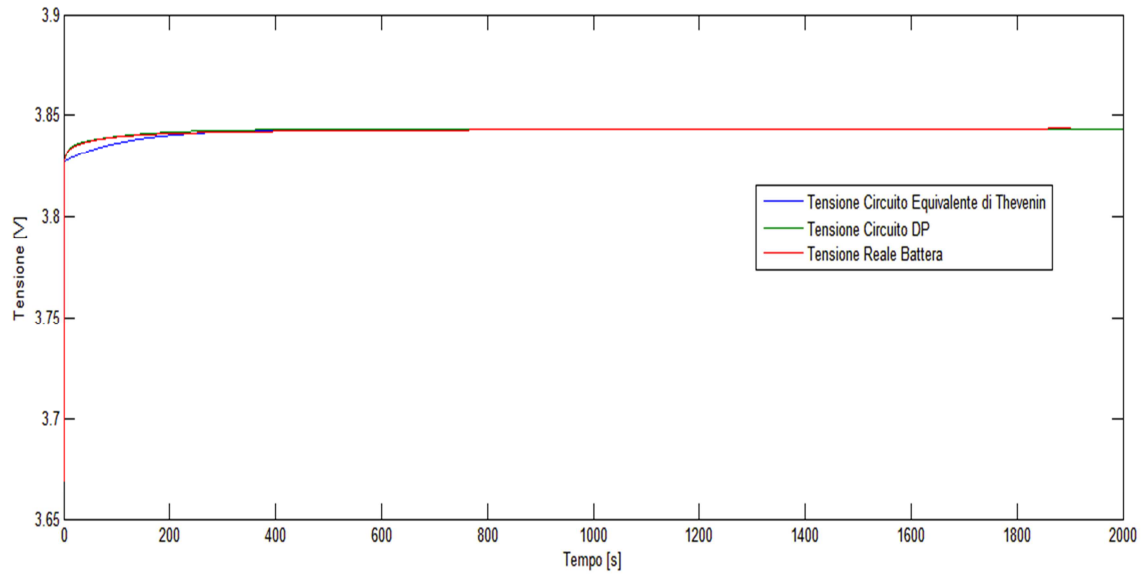


Fig. 4.19 – Confronto della risposta transitoria della tensione utilizzando un modello DP, oppure un modello equivalente di Thevenin. Il transitorio in oggetto è dovuto all'apertura del circuito durante la scarica con una corrente standard pari a 3,1A

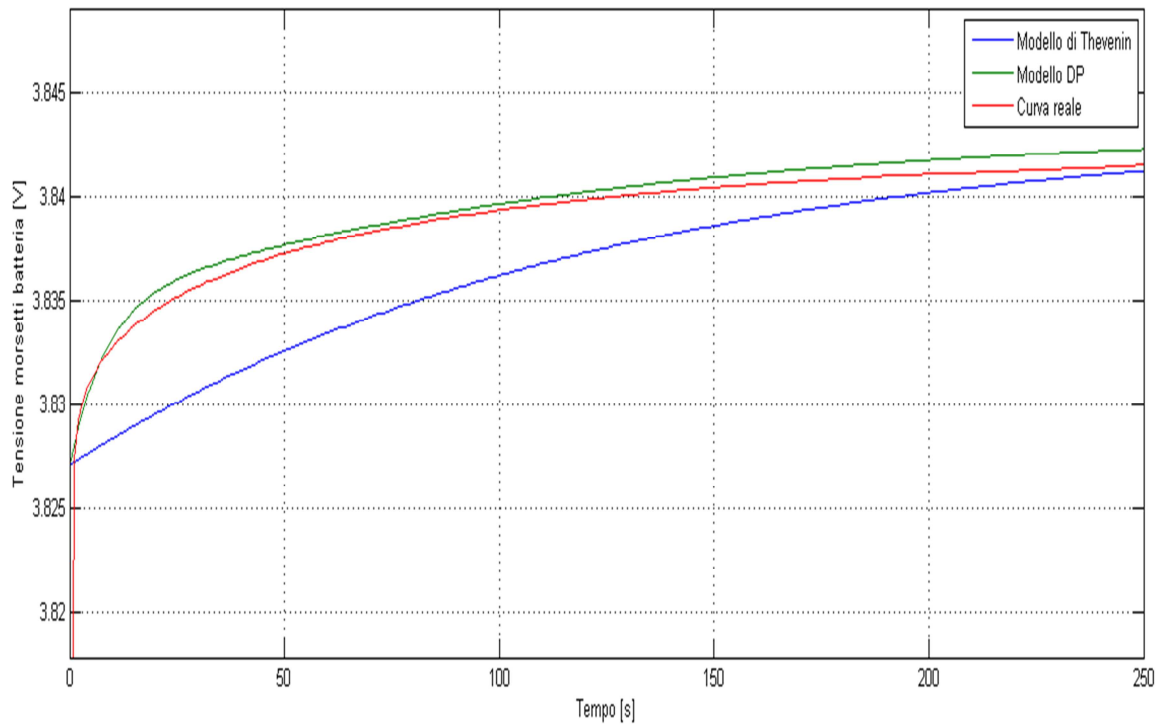


Fig. 4.20 – Zoom sul confronto della risposta transitoria della tensione utilizzando in modello DP, oppure un modello equivalente di Thevenin



Dal confronto si riescono a dimostrare tutti i discorsi che si sono detti nei capitoli precedenti. Cioè che un circuito con due costanti di tempo riesce a modellizzare quasi perfettamente la risposta dinamica della batteria. Mentre un circuito con una sola costante di tempo non è in grado di inseguire la risposta dinamica nei primi istanti, mentre la insegue egregiamente a regime. Per il confronto delle prove sperimentali che verranno presentate nel capitolo successivo, si adotterà un modello DP, perché di maggiore precisione.

#### 4.4 Simulazione numerica di una batteria al Litio

In questo paragrafo si vogliono eseguire delle simulazioni numeriche sul circuito equivalente di una batteria al Litio tramite un modello DP. Il software utilizzato è Simulink ed il circuito è rappresentato nelle seguenti figure, Fig. 4.21 e Fig. 4.22.

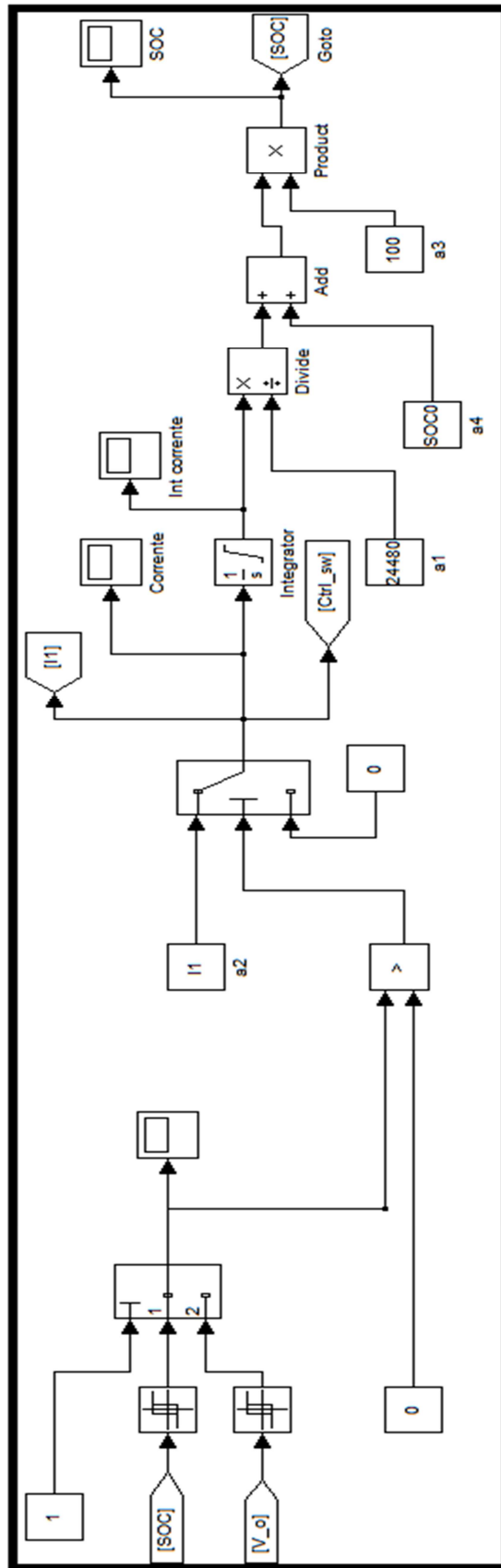


Fig. 4.21 – Modello Simulink, realizzazione anello di corrente con controllo in tensione e stato di carica

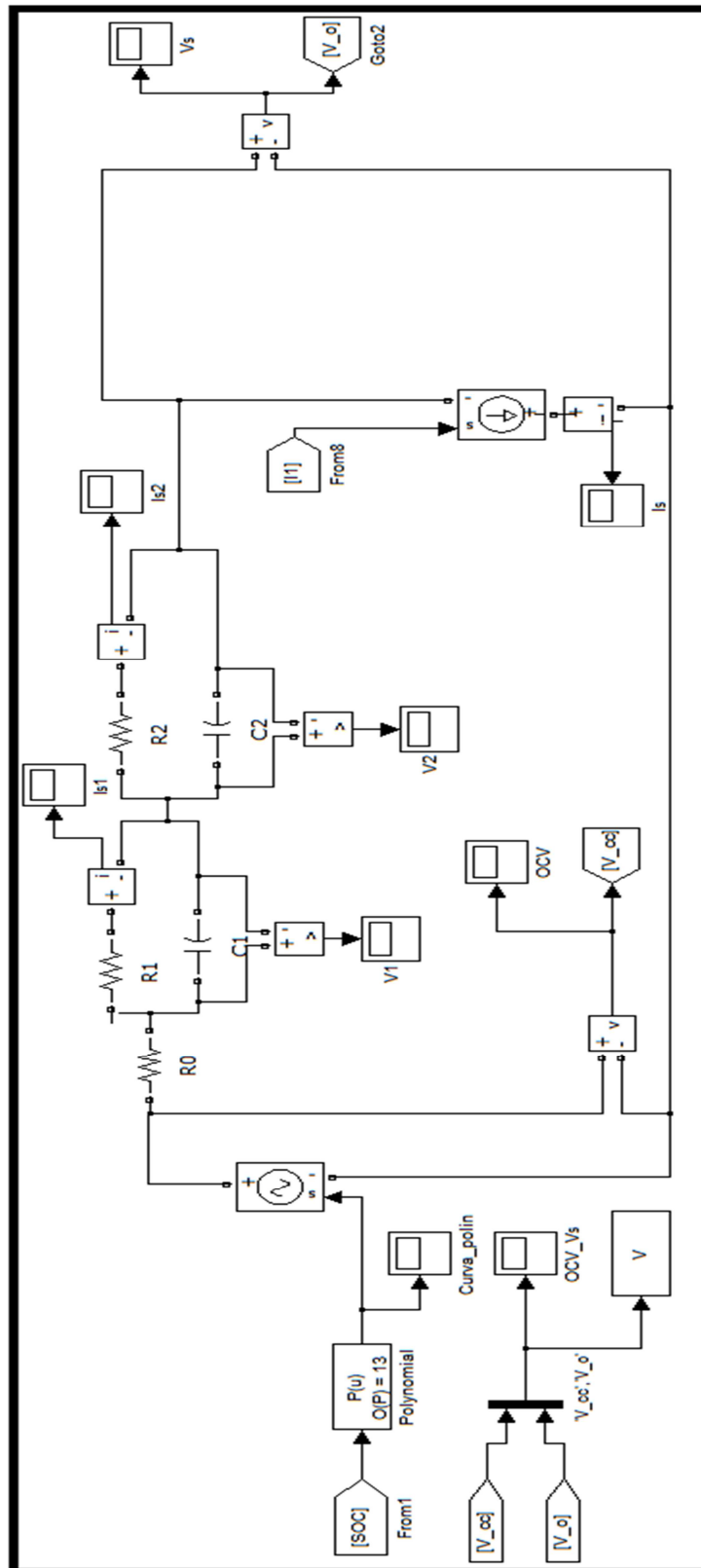


Fig. 4.22 – Modello Simulink, realizzazione circuito a due parametri

Ora di vogliono tracciare, per completezza alcune curve a differenti correnti, risultanti dalle simulazioni con il circuito appena presentato. Sarà doveroso anche valutare come il circuito equivalente approssimi la realtà ricavata dalle prove sperimentali, ma ciò verrà implicitamente confrontato nel capitolo successivo, dove si faranno test e confronti tra varie scariche a correnti differenti. Nelle figure successive, si vuole rappresentare la scarica completa della batteria a: 3.1A, 2.5A, 3.5A, 4A e 4.5A; nelle corrispondenti figure: Fig. 4.23, Fig. 4.24, Fig. 4.25, Fig. 4.26, Fig. 4.27.

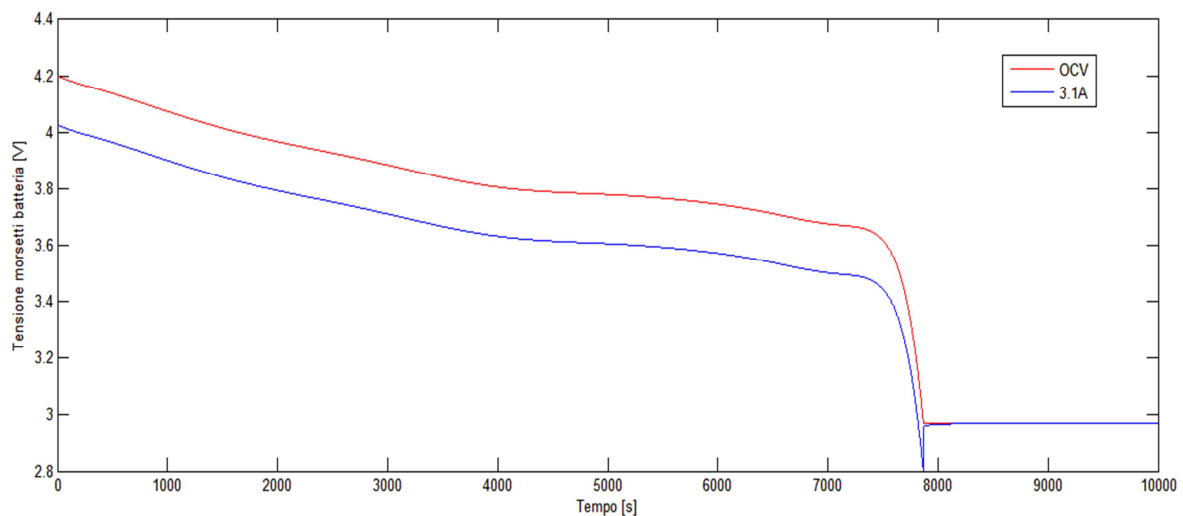


Fig. 4.23 – Simulazione circuito DP; la curva rossa rappresenta la OCV, mentre quella blu rappresenta la tensione di scarica con corrente pari a 3,1A, in funzione del tempo di scarica

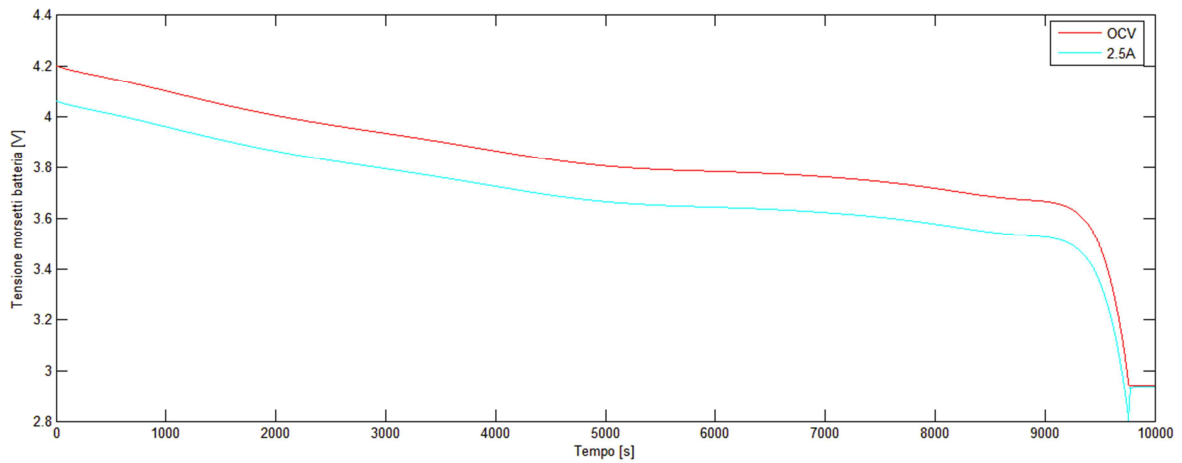


Fig. 4.24 – Simulazione circuito DP; la curva rossa rappresenta la OCV, mentre quella azzurra rappresenta la tensione di scarica con corrente pari a 2,5A, in funzione del tempo di scarica

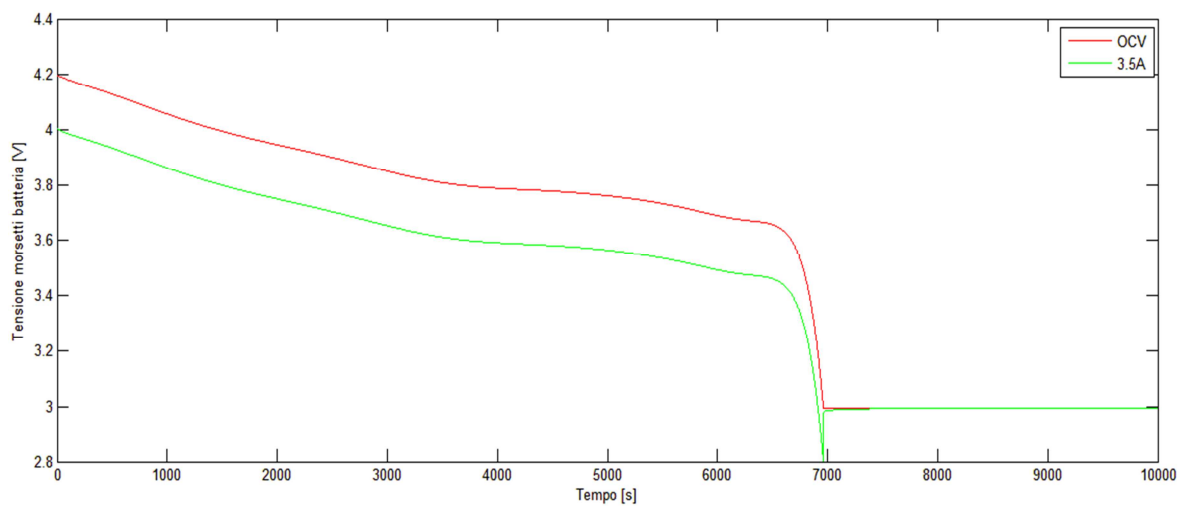


Fig. 4.25 – Simulazione circuito DP; la curva rossa rappresenta la OCV, mentre quella verde rappresenta la tensione di scarica con corrente pari a 3,5A, in funzione del tempo di scarica

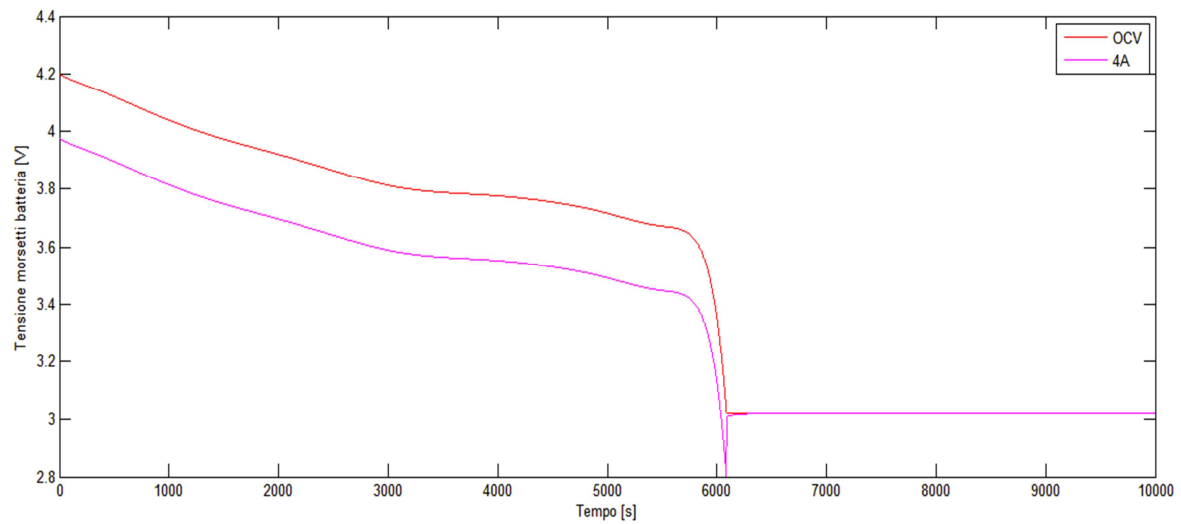


Fig. 4.26 – Simulazione circuito DP; la curva rossa rappresenta la OCV, mentre quella viola rappresenta la tensione di scarica con corrente pari a 4A, in funzione del tempo di scarica

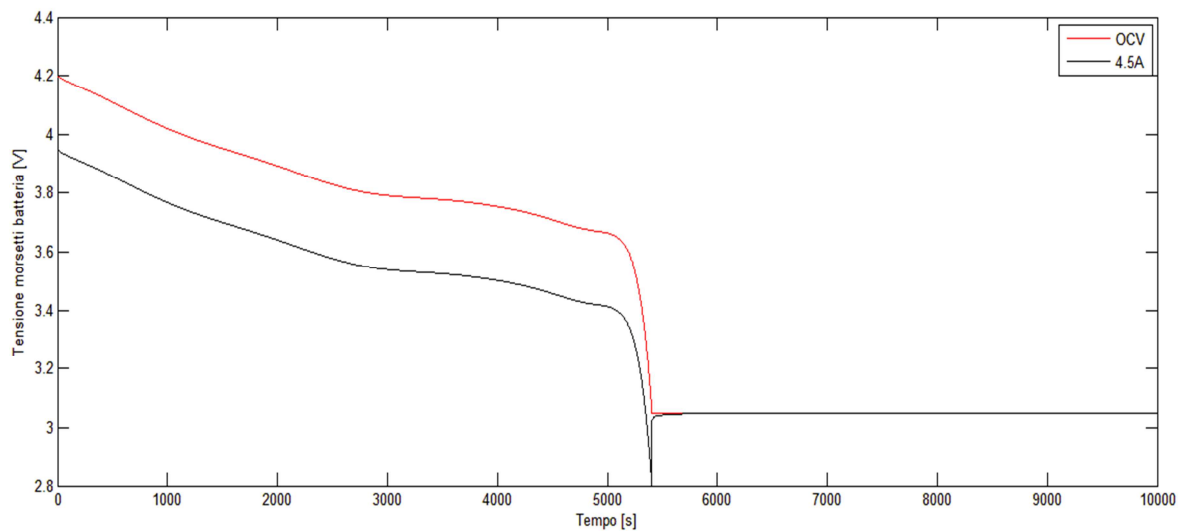


Fig. 4.27 – Simulazione circuito DP; la curva rossa rappresenta la OCV, mentre quella nera rappresenta la tensione di scarica con corrente pari a 4,5A, in funzione del tempo di scarica

## 5. Prove sperimentali per la valutazione della presenza di correlazione tra la tensione e la corrente di scarica

### 5.1 Introduzione

In questo capitolo si vogliono effettuare dei test per capire se si è possibile individuare lo stato di carica della batteria misurando esclusivamente la tensione ai suoi morsetti. Questo capitolo è nato per cercare di trovare un modo in grado di capire lo stato di carica di una batteria velocemente e che può essere riadattato a diverse batterie al Litio. Perché vi è bisogno di un modo per poter capire lo stato di carica di una batteria con queste peculiarità? La risposta nasce focalizzando l'attenzione sui veicoli elettrici, o meglio sui veicoli con la unica trazione elettrica. Questo tipo di veicolo ha bisogno di una stazione di ricarica ed essa può essere ad uso esclusivo per quel veicolo (ricarica privata), oppure ad uso comune (es. stazione di ricarica cittadina). La ricarica privata può essere concepita per l'uso di un solo veicolo, e quindi adatta ad a ricaricare una sola batteria la Litio. Un punto di ricarica pubblico, d'altro canto deve essere in grado di ricaricare un diverso numero di veicoli. Nel capitolo successivo si entrerà un po' più nel dettaglio della stazione di ricarica e del dialogo tra veicolo e colonnina; mentre ora si vuole solo fare una breve introduzione per capire il motivo della scelta di effettuare queste prove sperimentali. Si è scelto di effettuare questo tipo di prove perché i punti di ricarica pubblici<sup>22</sup> devono essere in grado di capire quanta energia la colonnina deve essere in grado di fornire per completare la carica, e quindi è necessario conoscere lo stato di carica iniziale della batteria appena essa viene connessa alla colonnina. Ogni batteria dei veicoli elettrici possiede un sistema, chiamato BMS – Battery Management System, che controlla lo stato interna della batteria. Questo sistema è sicuramente in grado di fornire una stima dello stato di carica interna della batteria, ma non sempre è disponibile sui protocolli di comunicazione tra veicolo e colonnina. Questo è il motivo principale che ha spinto ad

---

<sup>22</sup> Con il termine pubblici non si vuole intendere solo quei punti di ricarica di proprietà delle autorità pubbliche (comuni, provincie, regioni), ma anche quei punti di proprietà delle aziende che offrono un servizio di ricarica ai conducenti di veicoli elettrici (es. parcheggi di scuole, aziende e veri e propri "distributori di energia")

effettuare prove di questo tipo. Quindi ciò che si vuole testare è capire se leggendo la tensione ai capi di una batteria si è in grado di conoscere lo stato di carica. In questo modo la colonnina sarà in grado di procedere con gli opportuni calcoli per completare al meglio la ricarica del veicolo elettrico. La gestione della carica da parte della colonnina sarà spiegata meglio nel capitolo successivo. Ora si è voluto solamente spiegare il ragionamento che ha portato ad effettuare prove di questo tipo.

## 5.2 Test sperimentali

Per capire lo stato di carica di una batteria leggendo la tensione ai morsetti porta ad alcune valutazioni non semplici. Un veicolo elettrico che procede su strada può dover effettuare pendenze ed accelerazioni diverse. Per questo motivo l'andamento della tensione ai capi del veicolo non sarà uguale a quelle tracciate a corrente costante. Ma avrà andamenti diversi a seconda della potenza richiesta al veicolo, e quindi a seconda della corrente in grado di fornire quella potenza in quell'istante. Per capire se dalla tensione si può ricavare l'andamento lo stato di carica della batteria si deve capire se la tensione ai morsetti della batteria è indipendente dalla corrente di scarica. Guardando le curve di scarica simulate nel capitolo precedente si può capire come la tensione ai morsetti della batteria sia fortemente influenzata dalla corrente di scarica, e ciò ci permette di escludere per il momento la possibilità di capire lo stato di carica di una batteria leggendo la sola tensione ai morsetti esterni. Ciò che però fa riflettere è come si è proceduto per definire la tensione interna della batteria: essa è stata definita univocamente e quindi si può pensare che essa possa essere svincolata dalla corrente di scarica. Ma il problema è che la tensione interna della batteria non si può misurare, ma si deve valutare con tutti i test impulsivi già ampiamente spiegati nel capitolo precedente. Quindi la tensione di circuito aperto, per una batteria in normale funzionamento, non è direttamente accessibile. Focalizzandoci sul modo di valutazione della OCV si può notare come essa può diventare misurabile direttamente ai morsetti della batteria quando l'accumulatore è sconnesso dal carico, cioè quando esso è a vuoto. Ma un veicolo elettrico che deve procedere con la ricarica, deve essere intrinsecamente sconnesso dal proprio carico, perché l'utente che si avvia alla ricarica dovrà spegnere il veicolo e recarsi alla colonnina per connettere l'autovettura alla stazione di ricarica. Quindi ora si deve



procedere nel capire se le affermazioni fino ad ora annunciate siano veritiere. Ricapitolando si vogliono effettuare un certo numero di test sulla batteria con diverse correnti di scarica, valutando la tensione di circuito aperto in un certo numero di punti durante la scarica. In altre parole si è deciso di aprire il circuito di scarica in intervalli di tempo definiti, in modo da estrarre sempre la stessa quantità di carica anche con un diverso valore di corrente di scarica. Prima di iniziare con i test si deve fare una piccola precisazione che è utile a capire tutti i valori di partenza di ogni prova. Nei prossimi test, tra le diverse scariche a correnti differenti, la batteria sarà caricata con la corrente standard, 3,1A; in questo modo la batteria raggiungerà una carica sempre pari al 76.8 % e quindi la scarica partirà da una DOD iniziale pari a 23.2 %.

### 5.2.1 Test con corrente pari a 3.1A, prova di riferimento

La prima prova effettuata sarà valutata con una corrente di 3.1A. Ciò che si vuole fare è scaricare la batteria con una corrente pari a 3.1A, aprendo il circuito ogni 10 minuti ed attendendo per altri 15 minuti che i transistori interni dovuti alle coppie RC si esauriscano così da ottenere il reale valore della tensione di circuito aperto. Aprendo il circuito ogni 10 minuti si estrarrà il 7.5980 % dello stato di carica. Una domanda che può sorgere spontanea è perché non si è imposto un valore di SOC, ricavando ogni quanto tempo si deve aprire il circuito. La risposta risiede nella strumentazione utilizzata: per aprire il circuito si è usato uno switcher temporizzato, Fig.3.5, il quale è settabile definendo il tempo di commutazione dei contatti, quindi l'utilizzo di un tempo intero rende l'operazione di misura più affidabile. Si vuole mostrare i risultati della prova con 3.1A, Fig. 5.1.

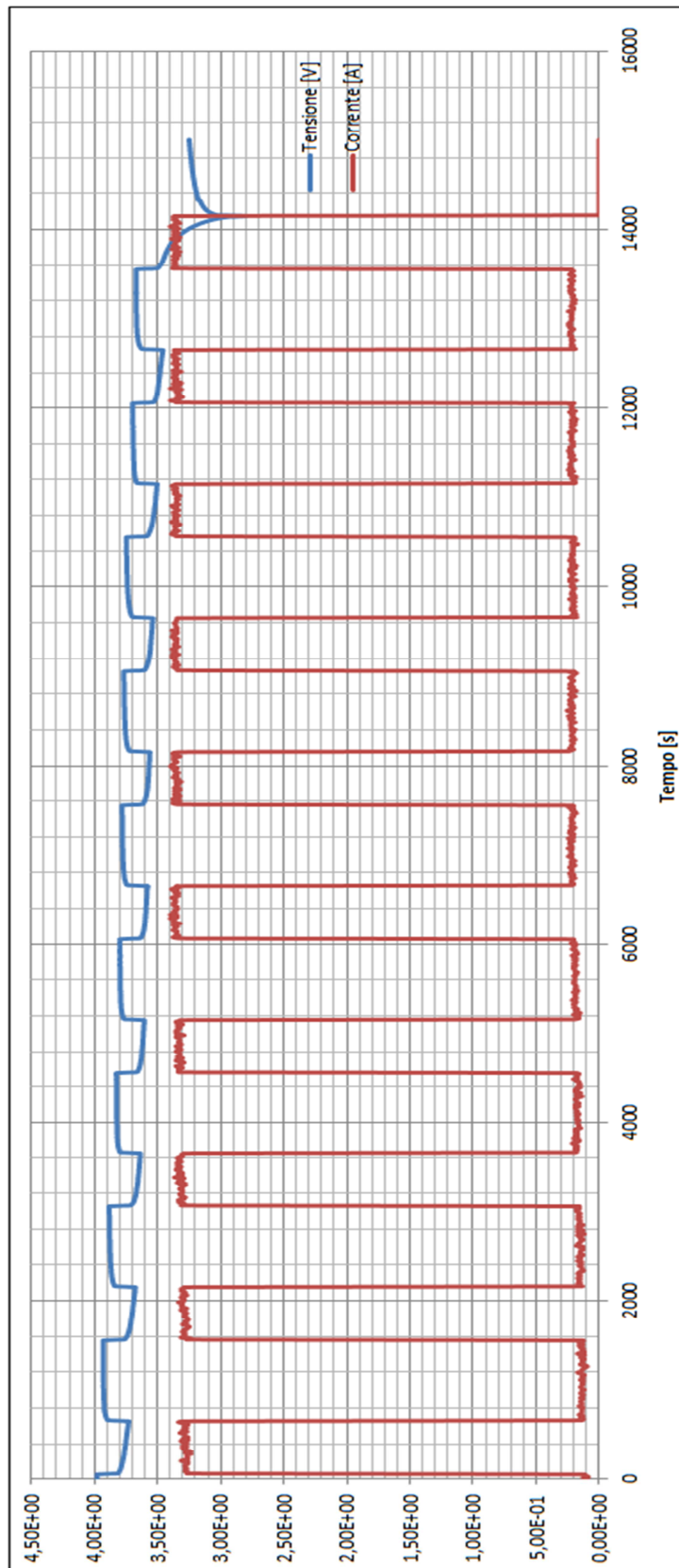


Fig. 5.1 – Prova di scarica per la valutazione della correlazione tra scariche a correnti differenti. Prova standard con 3,1A, che sarà utilizzata come prova di riferimento

Si vogliono indicare i valori trovati al termine dei 15 minuti, nei quali la batteria è sconnessa dal carico. Essi sono visibili nella seguente tabella, Fig. 5.2:

Tempo [s]	DOD%	V[V]
0	23,2	3,9813
600	30,798	3,9316
1200	38,396	3,8851
1800	45,994	3,8274
2400	53,592	3,8006
3000	61,19	3,7819
3600	68,788	3,7686
4200	76,386	3,7477
4800	83,984	3,6986
5400	91,582	3,6718
5936	99,65	3,2528

Fig. 5.2 – Valori di OCV con 3,1A

Osservando dettagliatamente la tabella, come detto in precedenza la OCV è valutata ogni 600 secondi (10 minuti), ma l'ultimo punto non è valutato con lo stesso gap di tempo. Ciò è dovuto dal fatto che la batteria ha raggiunto il termine della scarica prima del termine dei 600 secondi. Quindi i valori utili per la correlazione tra le varie correnti sono tutti quei punti con i seguenti valori di DOD %: 23.2, 30.798, 38.396, 45.994, 53.592, 61.19, 68.788, 76.396, 83.984, 91.582. Per le successive prove si dovranno valutare i valori di OCV che si ottengono in corrispondenza degli stessi valori di DOD appena indicati, osservando se il valore di OCV non varia e quindi se si riesce a capire con una buona approssimazione il valore SOC interno alla batteria, leggendo la tensione.

### 5.2.2 Successivi test con differenti correnti di scarica

Ora l'approccio per valutare la correlazione tra tensione e corrente è diverso da quello fatto precedentemente, perché come accennato nel paragrafo precedente, si deve calcolare il tempo di apertura di ogni singolo test con diversi valori di corrente.

## PROVA DI CORRELAZIONE CON UNA CORRENTE PARI A 2.5A

Per estrarre sempre uno stato di carica pari a 7.598 % ad ogni step, con una corrente di 2.5A, bisogna mantenere la batteria connessa al carico per 12.40 minuti (744 secondi). I risultati che si sono ottenuti in questa prova sono visibili nella Fig. 5.3.

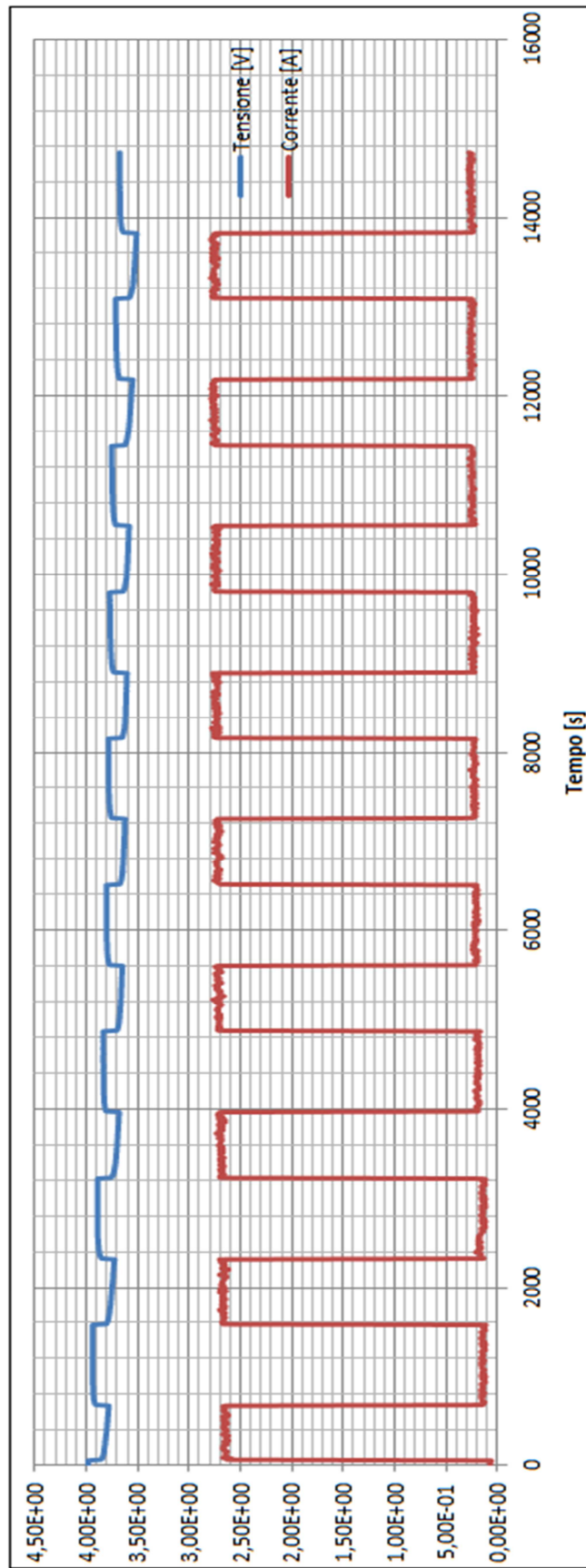


Fig. 5.3 – Prova di correlazione con 2,5A

Come detto in precedenza l'ultimo punto utile per il confronto tra le varie correnti è quello riferito al 91.582 % di DOD, come mostrato nella seguente tabella, Fig. 5.4.

Tempo [s]	DOD%	V[V]
0	23,2	3,9829
744	30,798	3,9385
1488	38,396	3,8894
2232	45,994	3,8359
2976	53,592	3,8044
3720	61,19	3,7851
4464	68,788	3,7718
5208	76,386	3,7531
5952	83,984	3,7146
6696	91,582	3,6750

Fig. 5.4 – Valori di OCV con 2,5A

#### PROVA DI CORRELAZIONE CON UNA CORRENTE PARI A 2A

Nel medesimo modo indicato nella precedente prova, si deve trovare il tempo di apertura per poter estrarre il 7.598 % di SOC per ogni step. Con una corrente di 2A, il tempo che risulta dai calcoli è pari a 15.5 minuti (930 secondi). I risultati della prova sono visibili in Fig. 5.5.

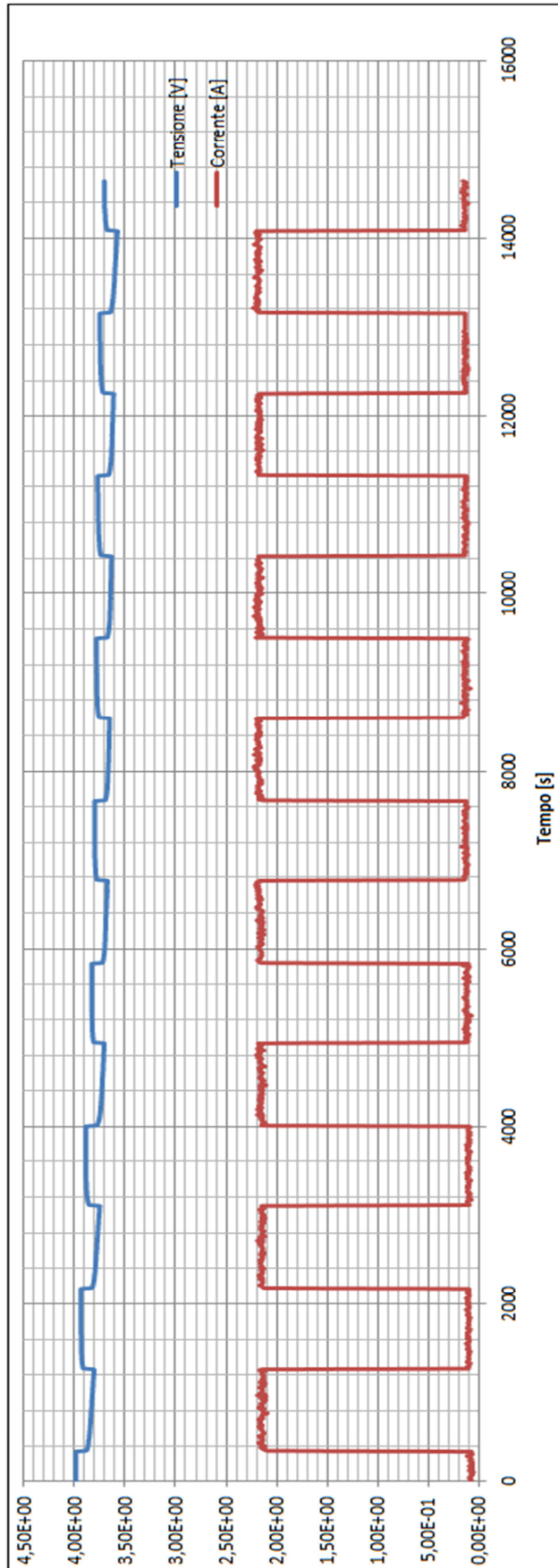


Fig. 5.5 – Prova di correlazione con 2A

I valori di tensione, quando la batteria è sconsnessa dal carico, sempre in corrispondenza degli stessi valori di SOC, sono indicati nella seguente tabella, Fig. 5.6.

Tempo [s]	DOD%	V[V]
0	23,2	3,9866
930	30,798	3,9353
1860	38,396	3,8888
2790	45,994	3,8311
3720	53,592	3,8023
4650	61,19	3,7835
5580	68,788	3,7691
6510	76,386	3,7493
7440	83,984	3,7076
8370	91,582	3,6745

Fig. 5.6 – Valori di OCV con 2A

#### PROVA DI CORRELAZIONE CON UNA CORRENTE PARI A 2.8A

Con una corrente pari a 2 A, il tempo per ogni intervallo di scarica, per avere sempre 7.598 % di SOC è pari a 11.07 minuti (664 secondi). I risultati di questa prova sono visibili nella Fig. 5.7.



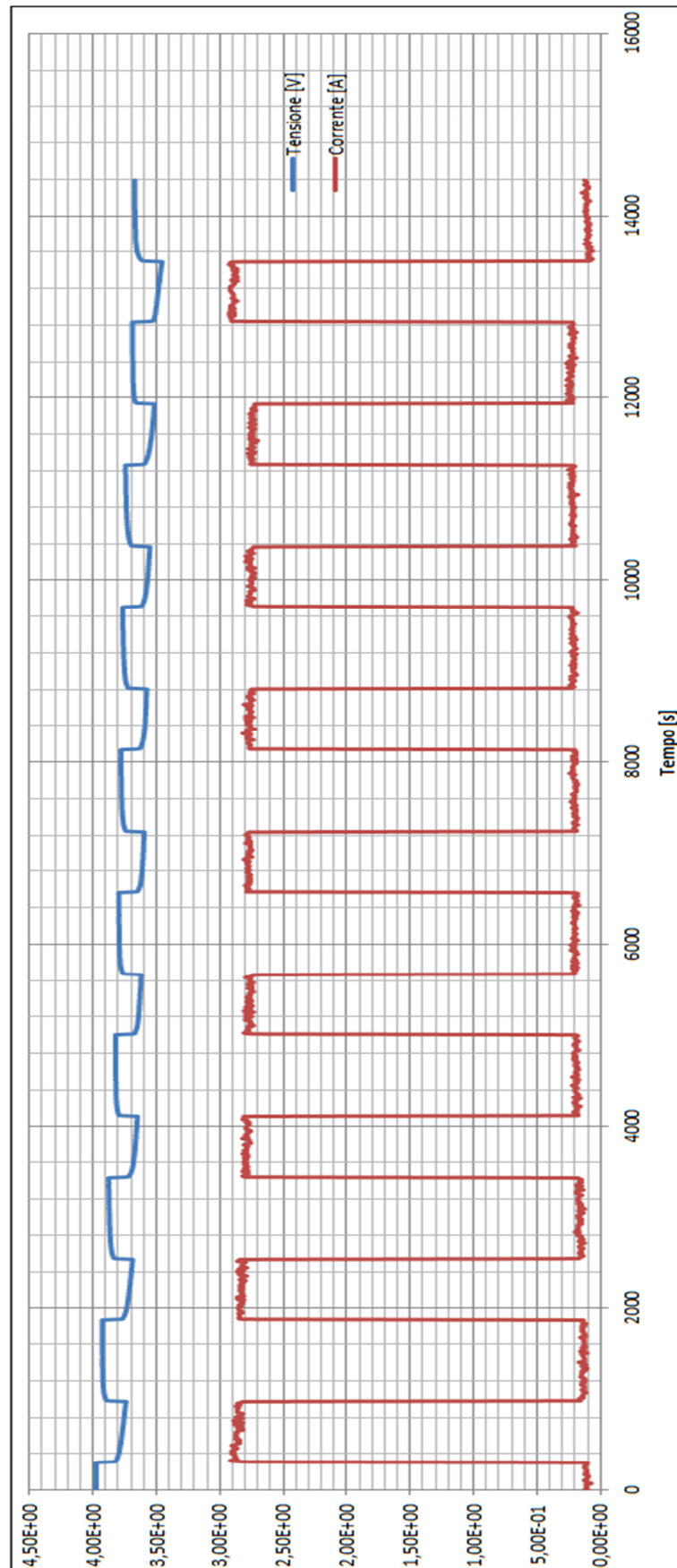


Fig. 5.7 – Prova di correlazione con 2,8A

Come per le altre prove, si vogliono indicare i valori di tensione alla fine dell'intervallo di tempo dove la batteria è sconnessa dal carico. Tali valori sono indicati nella seguente tabella, Fig. 5.8.

Tempo [s]	DOD%	V[V]
0	23,2	3,9765
664	30,798	3,9273
1328	38,396	3,8776
1992	45,994	3,8242
2656	53,592	3,7980
3320	61,19	3,7803
3984	68,788	3,7670
4648	76,386	3,7451
5312	83,984	3,6911
5976	91,582	3,6724

Fig. 5.8 – Valori di OCV con 2,8A

#### PROVA DI CORRELAZIONE CON UNA CORRENTE PARI A 2.2A

Il tempo per ogni intervallo di scarica con una corrente di 2.2A, è pari a 14.09 minuti (845.4 secondi), sempre per estrarre ad ogni step una carica pari a 7.598 % di SOC. I risultati di questo test sono visibili in Fig. 5.9.

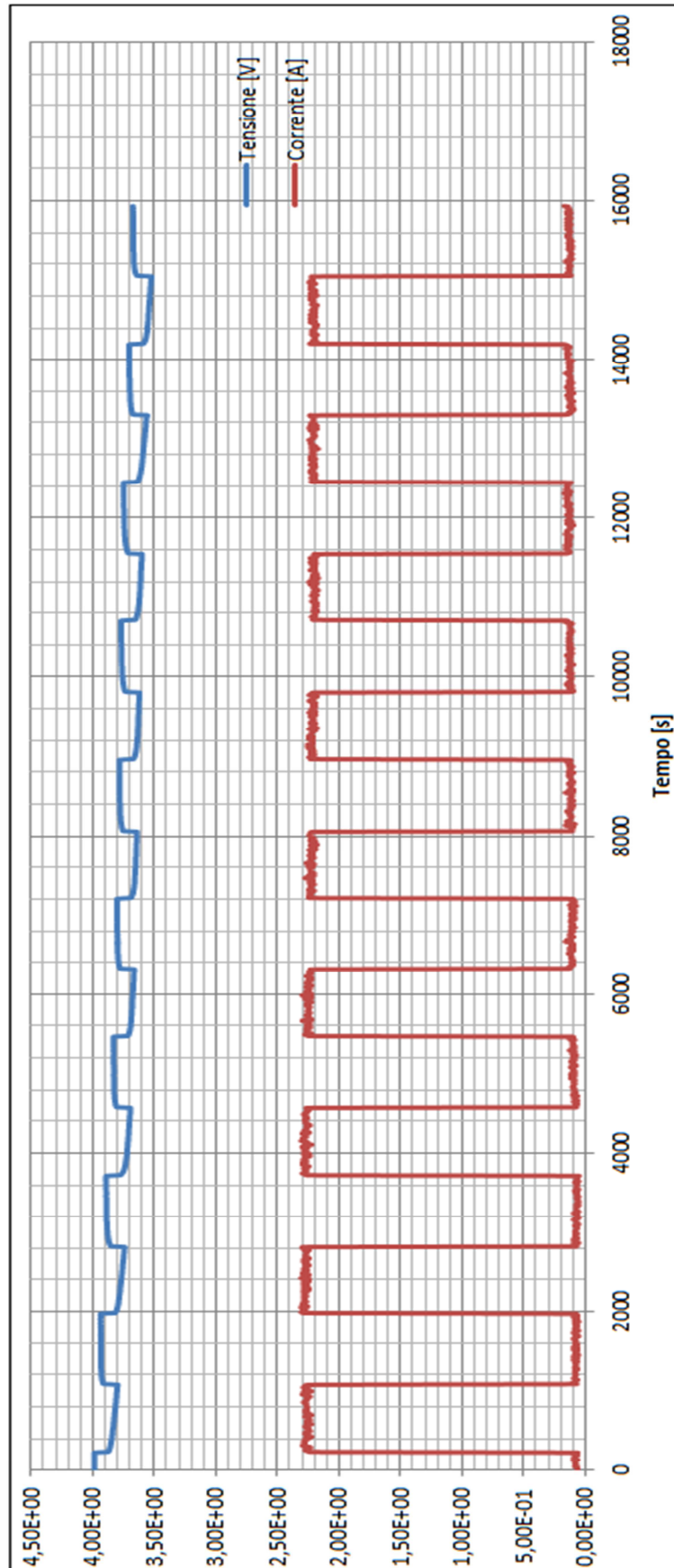


Fig. 5.9 – Valutazione correlazione con 2,2A

Più nel dettaglio i valori della tensione alla fine di ogni intervallo dove il circuito è aperto, sono indicati nella seguente tabella, Fig. 5.10.

Tempo [s]	DOD %	V[V]
0	23,2	3,9872
845,4	30,798	3,9359
1690,8	38,396	3,891
2536,2	45,994	3,83
3381,6	53,592	3,8017
4227	61,19	3,7835
5072,4	68,788	3,7702
5917,8	76,386	3,7499
6763,2	83,984	3,7039
7608,6	91,582	3,6734

Fig. 5.10 – Valori di OCV con 2,2A

#### PROVA DI CORRELAZIONE CON UNA CORRENTE PARI 3.6A

Come per le altre prove, si deve fissare il tempo di scarica per ogni intervallo. In questo caso esso è pari a 8.6 minuti (516.67 secondi). I risultati di questo test sono consultabili nella seguente figura, Fig. 5.11.

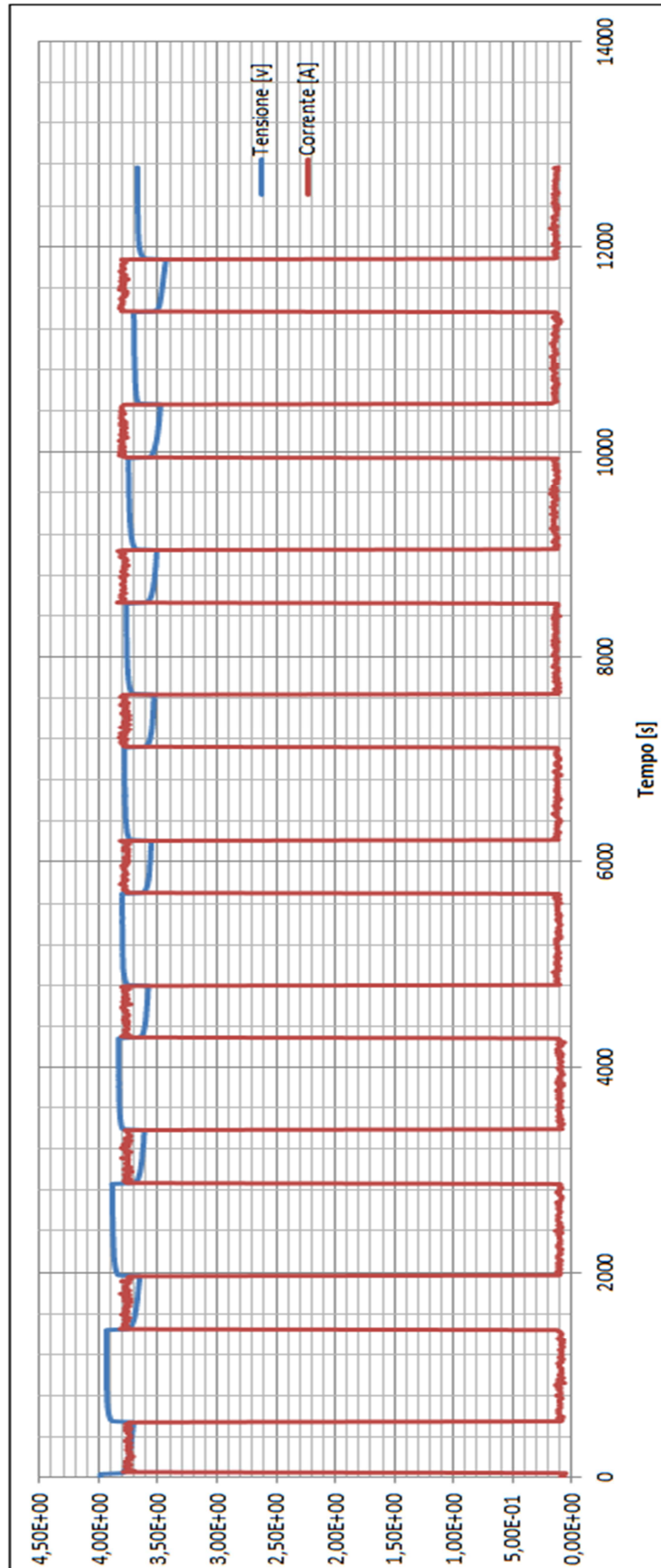


Fig. 5.11 – Valutazione correlazione con 3,6A

È doveroso, come per le altre prove, di indicare in una tabella i valori di tensione alla fine di ogni intervallo, nel quale la batteria è sconnessa dal carico. Tali valori sono riportati nella seguente tabella, Fig. 5.12.

Tempo [s]	DOD%	V[V]
0	23,2	3,9872
516,67	30,798	3,9353
1033,34	38,396	3,8878
1550,01	45,994	3,8316
2066,68	53,592	3,8028
2583,35	61,19	3,7841
3100,02	68,788	3,7691
3616,69	76,386	3,7493
4133,36	83,984	3,7039
4650,03	91,582	3,6745

Fig. 5.12 – Valori di OCV con 3,6A

### 5.2.3 Confronto dei risultati sperimentali

Una volta effettuate queste molteplici e lunghe prove, si deve valutare se vi è una correlazione tra le varie tensioni di circuito aperto trovate con diverse correnti di scarica. Quello che ci si aspetta di ottenere è che il valore di tensione, riferito ad uno stato di carica, non cambi. Solo se accadrà ciò si potrà con certezza affermare che lo stato di carica è stimabile leggendo la sola tensione di circuito aperto. Dopo questo breve riassunto, si devono confrontare i risultati. Il confronto visivo è illustrato nel seguente grafico, Fig. 5.13. Osservandolo, si nota immediatamente come la tensione che si trova quando la batteria è sconnessa dal carico sia univoca, e non dipende in alcun modo dalla corrente con la quale si è scaricata la batteria.

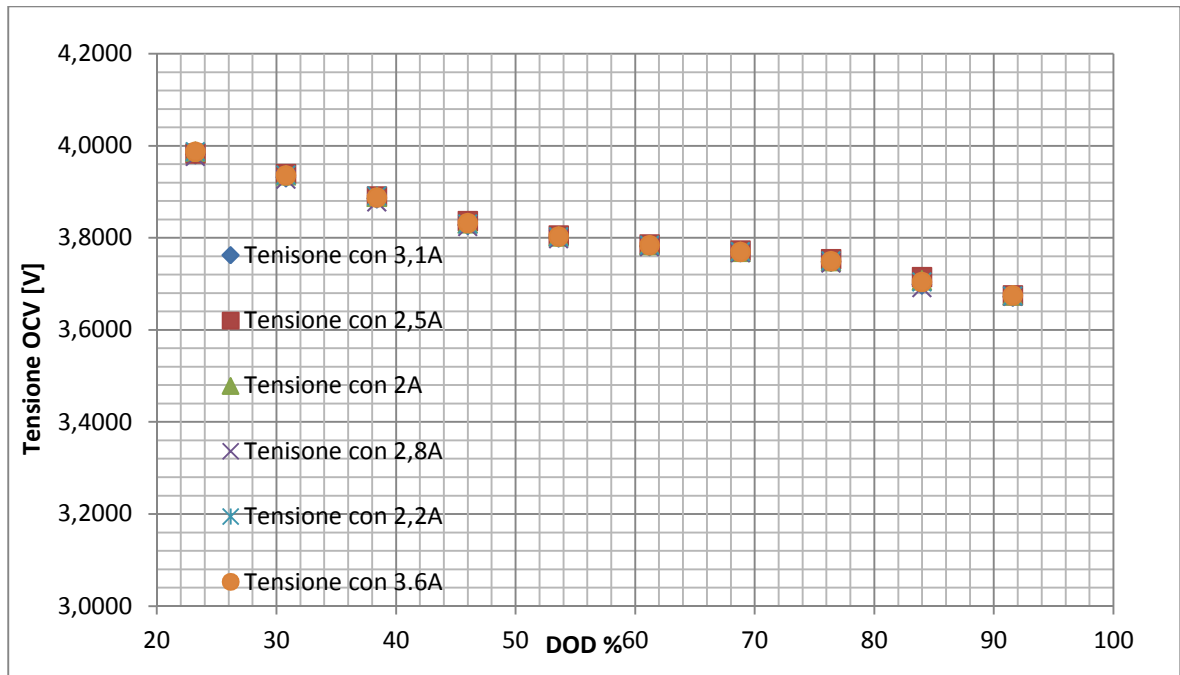


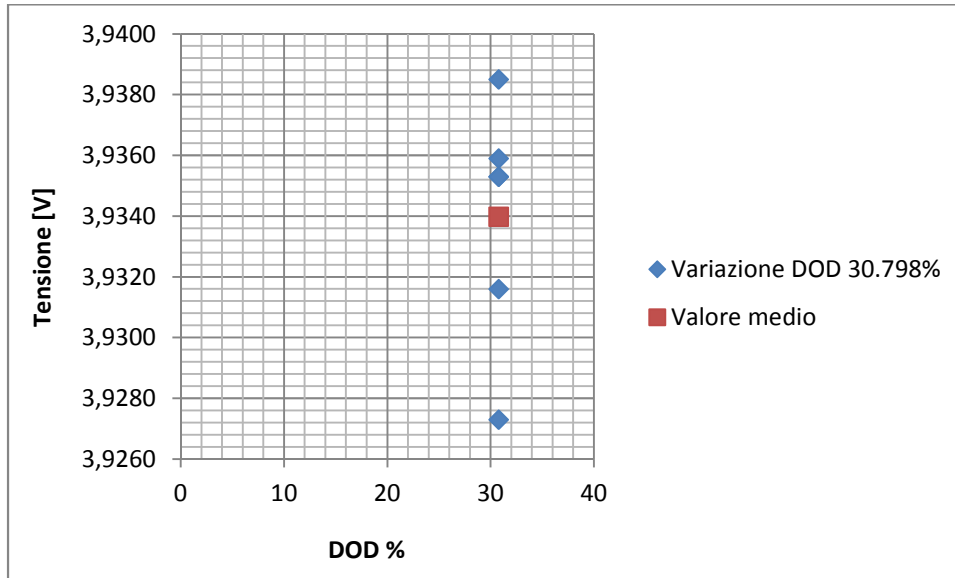
Fig. 5.13 – Confronto tra i vari valori di tensione ottenuti scaricando la batteria con diversi valori di corrente

È doveroso fare uno zoom su ogni punto mostrando meglio i risultati, così da poter valutare gli errori che possono incorrere con una stima di questo tipo. Quindi per ogni punto di DOD %, si vedrà la distribuzione dei valori, la deviazione standard e gli errori massimi positivi e negativi. Prima di mostrare i risultati si vuole fare una precisazione su di essi:

- Deviazione standard %, si intende la deviazione standard riferita al valor medio, per cento.
- Errore max positivo %, si intende la differenza tra il valore massimo ed il valore medio riferito al valore medio stesso, per cento;
- Errore max negativo %, si intende la differenza tra il valore minimo ed il valore medio riferito al valore medio stesso, per cento.

Dopo aver reso più comprensibili i risultati, si può procedere con la loro formalizzazione:

- VALORI CON UNA PROFONDITÀ DI SCARICA PARI A 30.798%, Fig. 5.14



	DOD %	V[V]
	30,798	3,9316
	30,798	3,9385
	30,798	3,9353
	30,798	3,9273
	30,798	3,9359
	30,798	3,9353
Valore medio	30,798	3,9340
Deviazione Standard %		0,1003
Errore max positivo %		0,1148
Errore max negativo %		0,1699

Fig. 5.14 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 30,798%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo e dell'errore max negativo

Nel capitolo precedente si aveva annunciato che il modello creato veniva confrontato con le sperimentazioni reali in questo capitolo. Infatti quello che si è pensato di fare è confrontare la tensione di circuito aperto della simulazione con quella realmente trovata



aprendo la simulazione con una DOD % pari a 30.798%. I risultati trovati sono visibili nella seguente figura, Fig. 5.15.

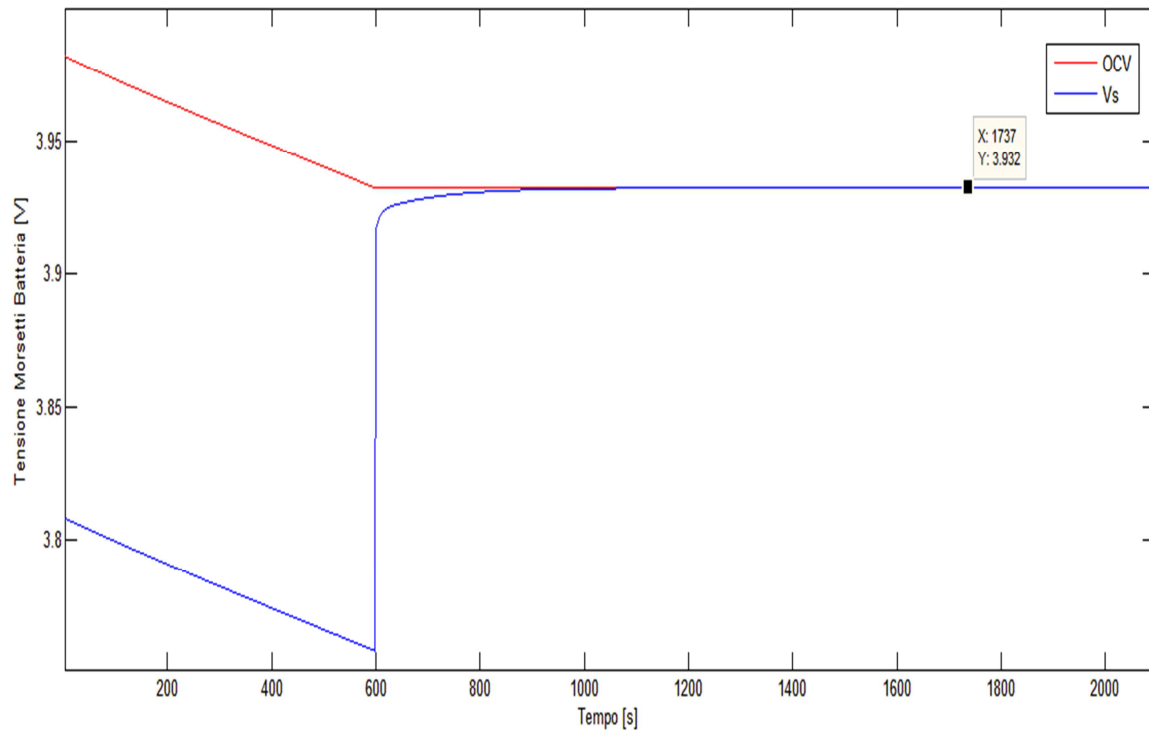
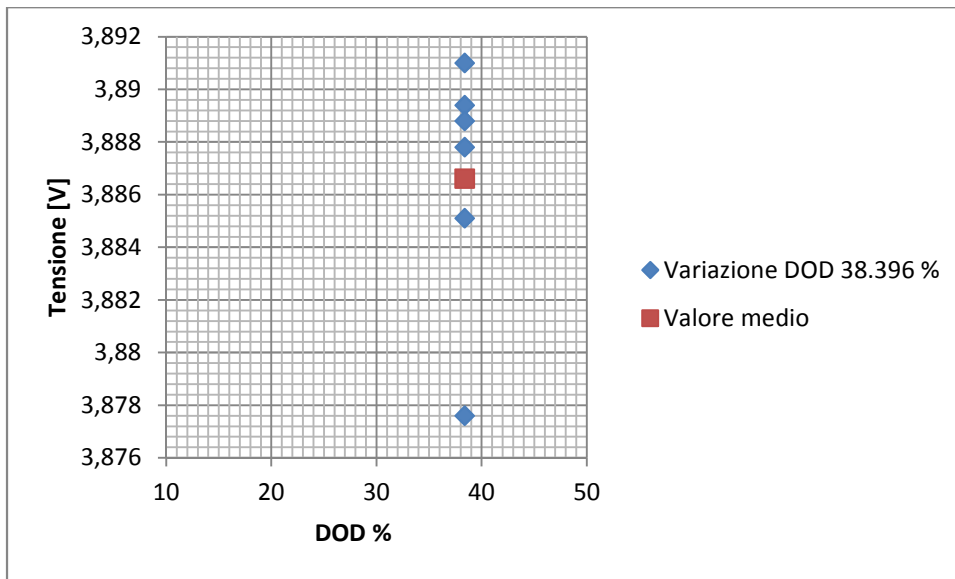


Fig. 5.15 – Andamento della simulazione Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 30,798%

Il valore della tensione simulata con una DOD = 30.798% è pari a 3.932V, tale valore è confrontabile con i valori trovati e quindi permette di confermare che il modello creato rispecchia fedelmente la realtà testata. Ora per tutte gli altri punti verranno esplicitati i duali risultati, senza ripetere i commenti effettuati in questo punto, perché solo ridondanti.

- VALORI CON UNA PROFONDITÀ DI SCARICA PARI A 38.396%, Fig. 5.16



	DOD %	V[V]
	38,396	3,8851
	38,396	3,8894
	38,396	3,8888
	38,396	3,8776
	38,396	3,891
	38,396	3,8878
Valore medio	38,396	3,8866
Deviazione Standard %		0,1243
Errore medio positivo %		0,1128
Errore medio negativo %		0,2320

Fig. 5.16 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 38,396%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo e dell'errore max negativo

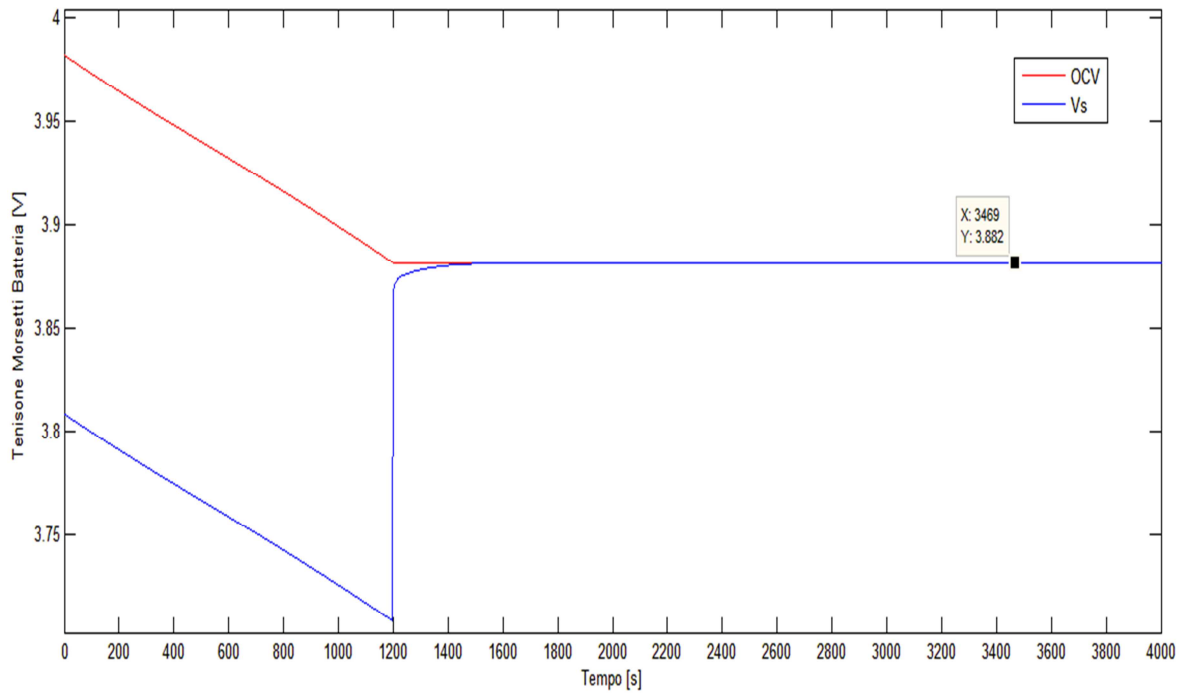
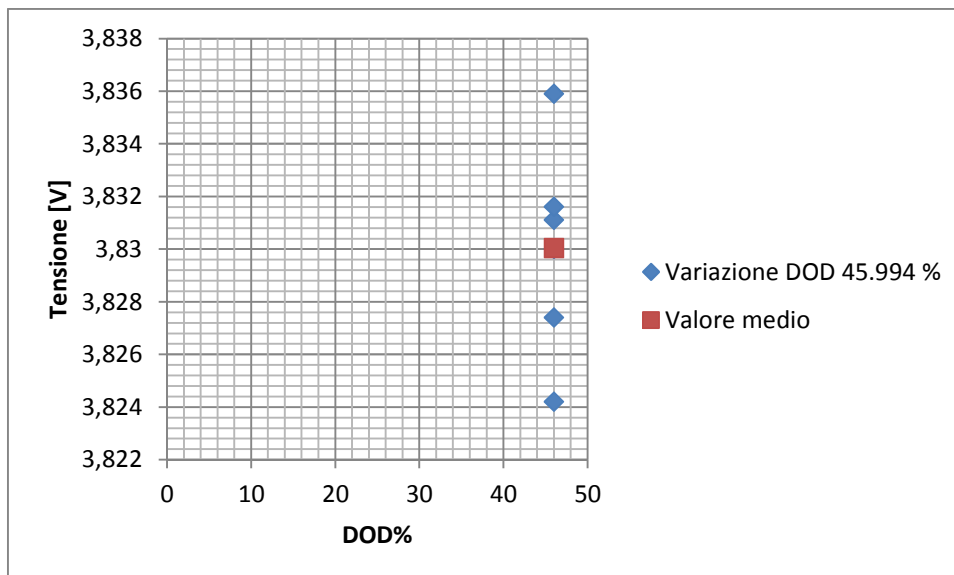


Fig. 5.17 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 38,396%

- VALORI CON UNA PROFONDITÀ DI SCARICA PARI A 45.994%, Fig. 5.18



	DOD %	V[V]
	45,994	3,8274
	45,994	3,8359
	45,994	3,8311
	45,994	3,8242
	45,994	3,83
	45,994	3,8316
Valore medio	45,994	3,8300
Deviazione Standard %		0,1038
Errore medio positivo %		0,1532
Errore medio negativo %		0,1523

Fig. 5.18 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 45,994%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo e dell'errore max negativo

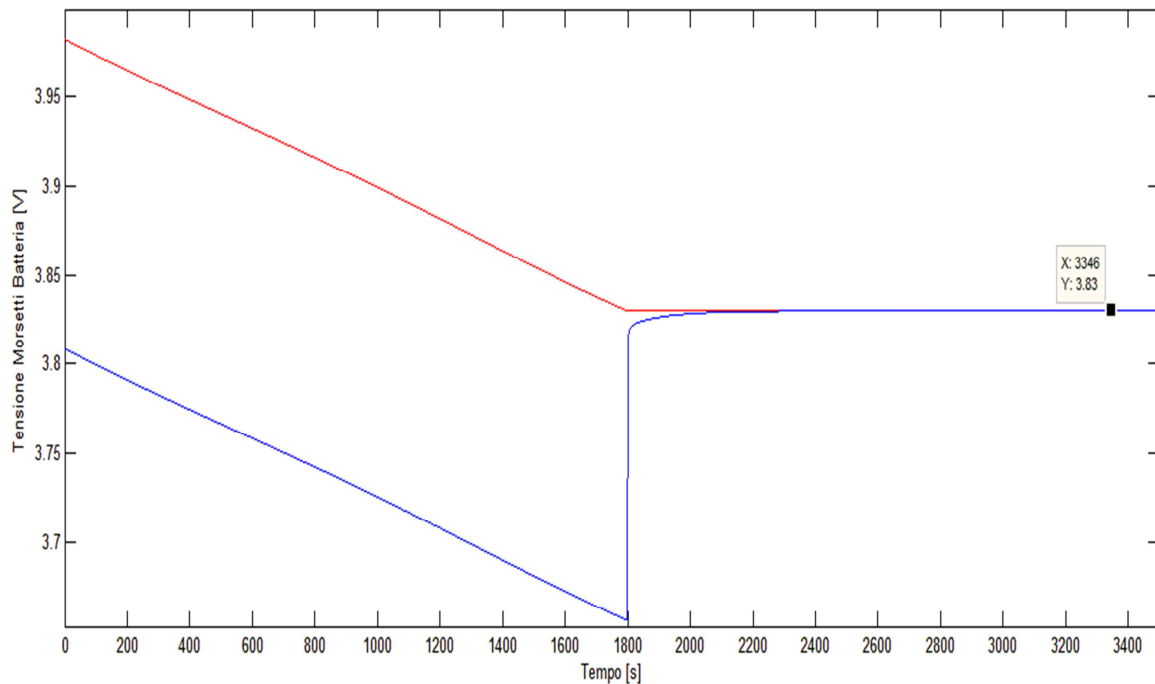
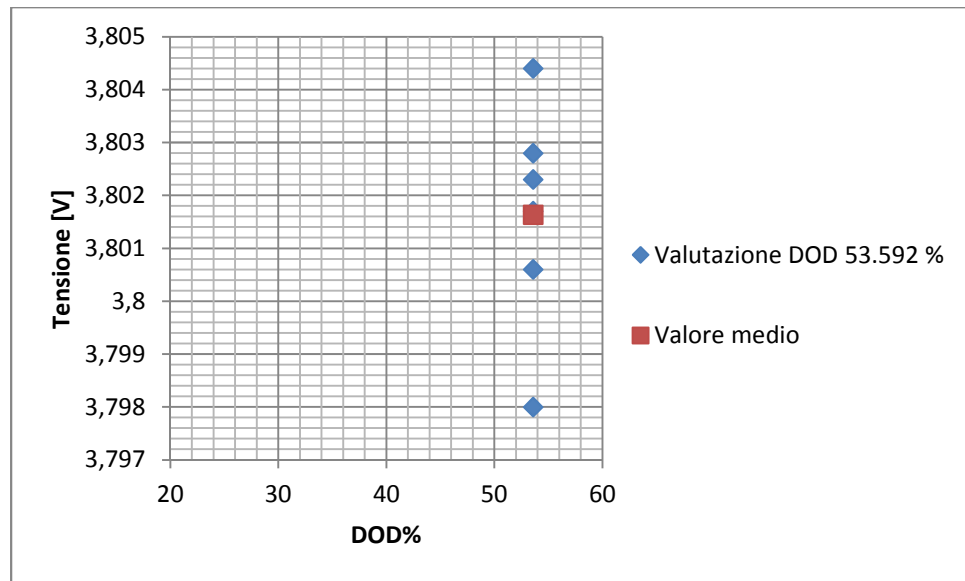


Fig. 5.19 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 45,994%

- VALORI CON UNA PROFONDITÀ DI SCARICA PARI A 53.592%, Fig. 5.20



	DOD %	V[V]
	53,592	3,8006
	53,592	3,8044
	53,592	3,8023
	53,592	3,798
	53,592	3,8017
	53,592	3,8028
Valore medio	53,592	3,8016
Deviazione Standard %		0,0573
Errore medio positivo %		0,0728
Errore medio negativo %		0,0956

Fig. 5.20 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 53,592%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo e dell'errore max negativo

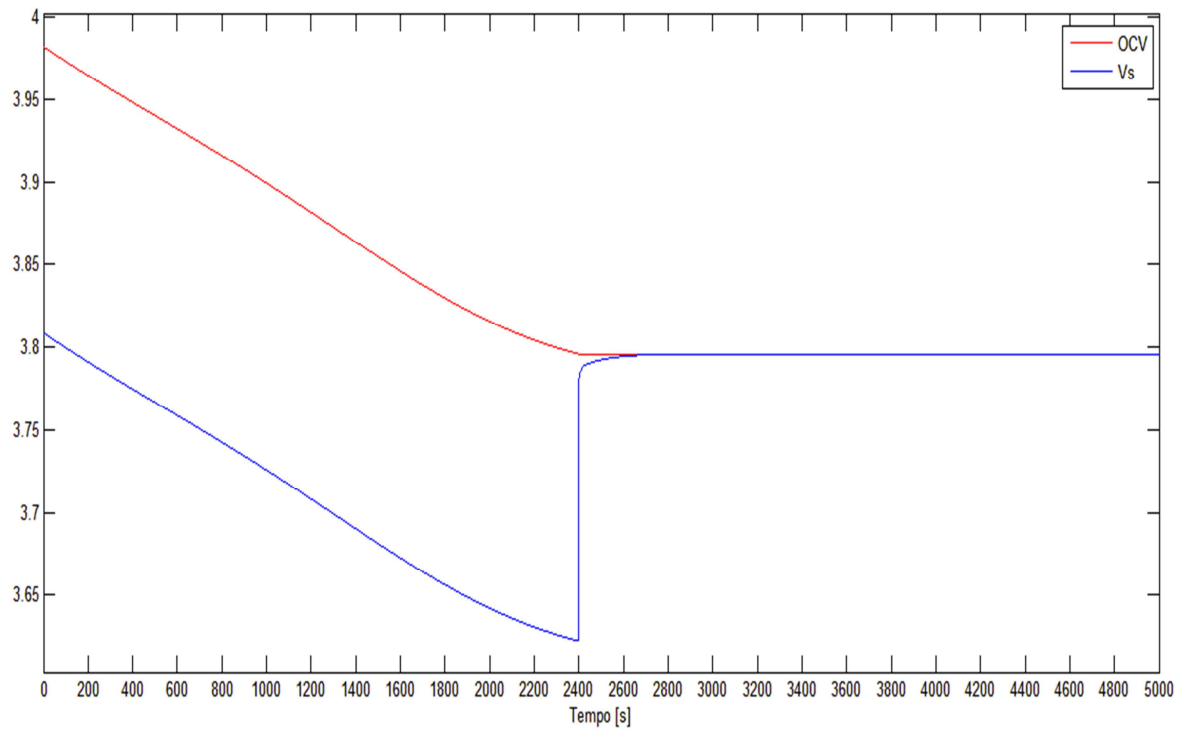
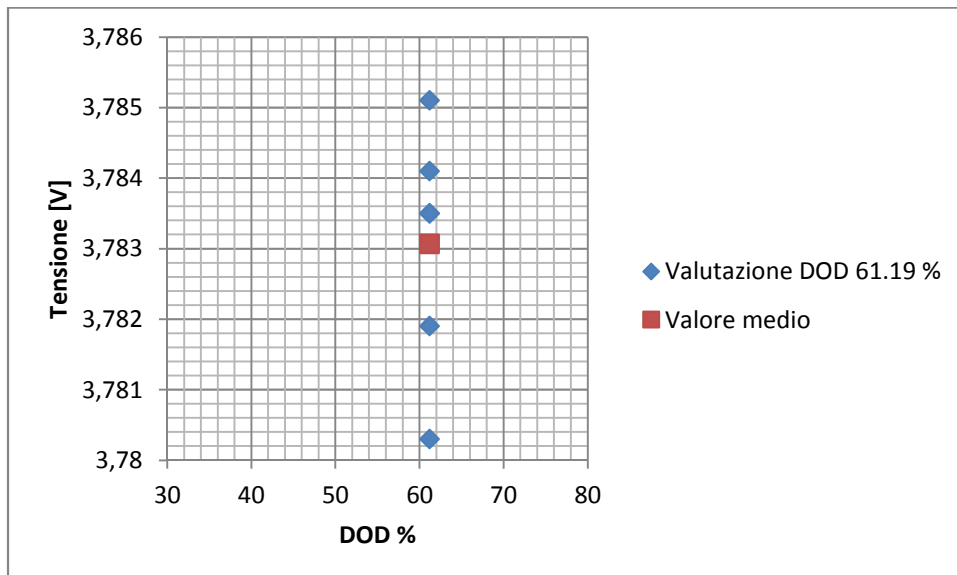


Fig. 5.21 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 53,592%

- VALORI CON UNA PROFONDITÀ DI SCARICA PARI A 61.19%, Fig. 5.22



	DOD %	V[V]
	61,19	3,7819
	61,19	3,7851
	61,19	3,7835
	61,19	3,7803
	61,19	3,7835
	61,19	3,7841
Valore medio	61,19	3,7831
Deviazione Standard %		0,0452
Errore medio positivo %		0,0537
Errore medio negativo %		0,0731

Fig. 5.22 - Valori di tensione nel punto con DOD pari a 61.19%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo, e dell'errore max negativo

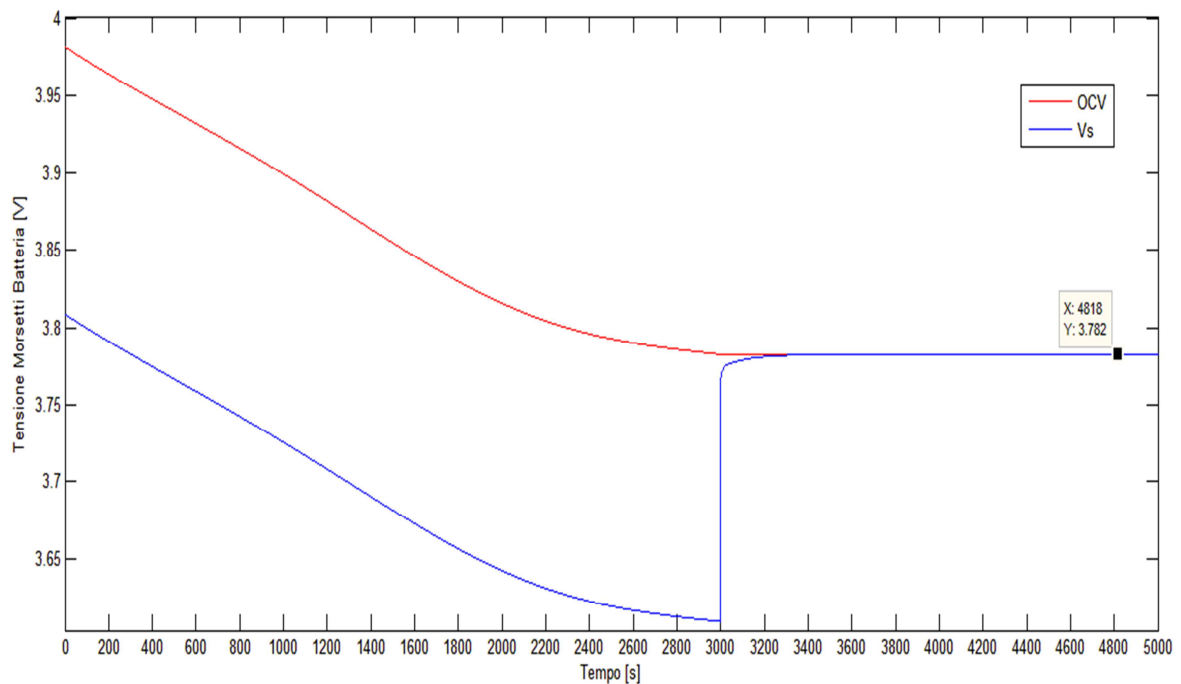
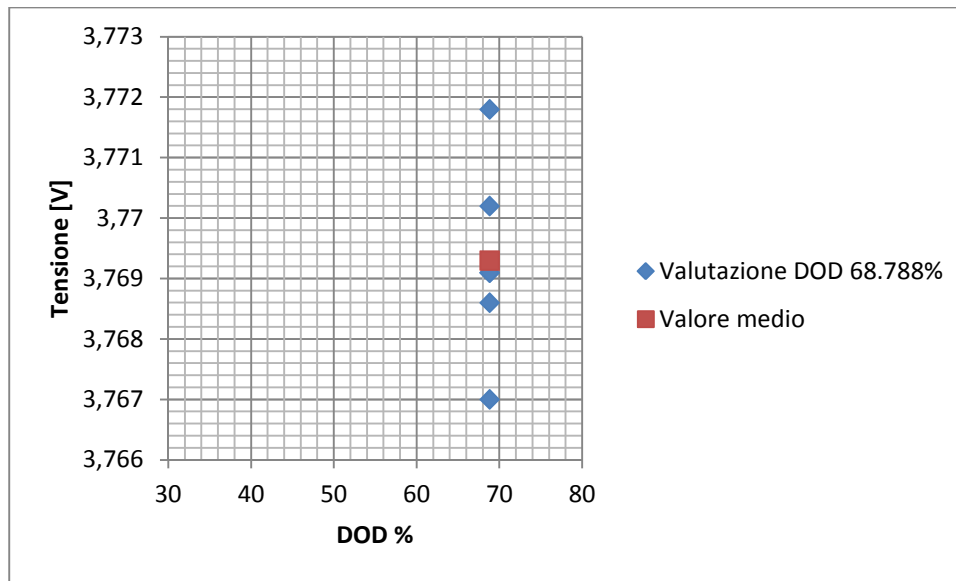


Fig. 5.23 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 61,19%

- VALORI CON UNA PROFONDITÀ DI SCARICA PARI A 68.788, Fig. 5.24



	DOD %	V[V]
	68,788	3,7686
	68,788	3,7718
	68,788	3,7691
	68,788	3,767
	68,788	3,7702
	68,788	3,7691
Valore medio	68,788	3,7693
Deviazione Standard %		0,0426
Errore medio positivo %		0,0663
Errore medio negativo %		0,0610

Fig. 5.24 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 68,788%, con valutazione della deviazione standard, dell’errore max positivo, e dell’errore max negativo



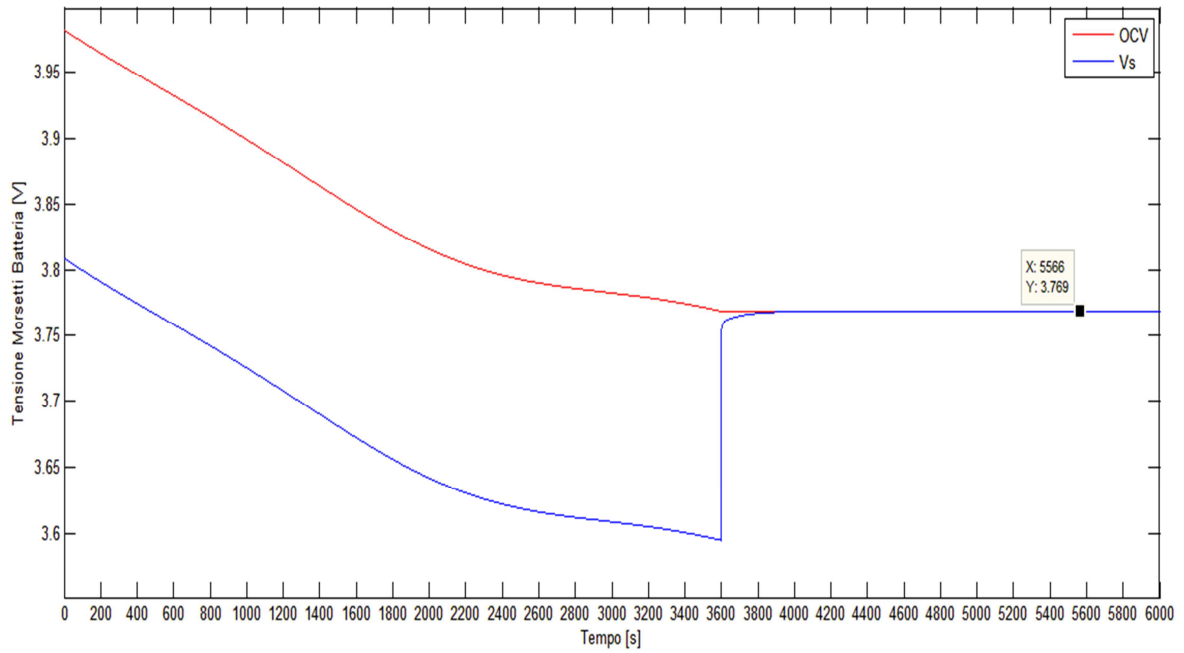
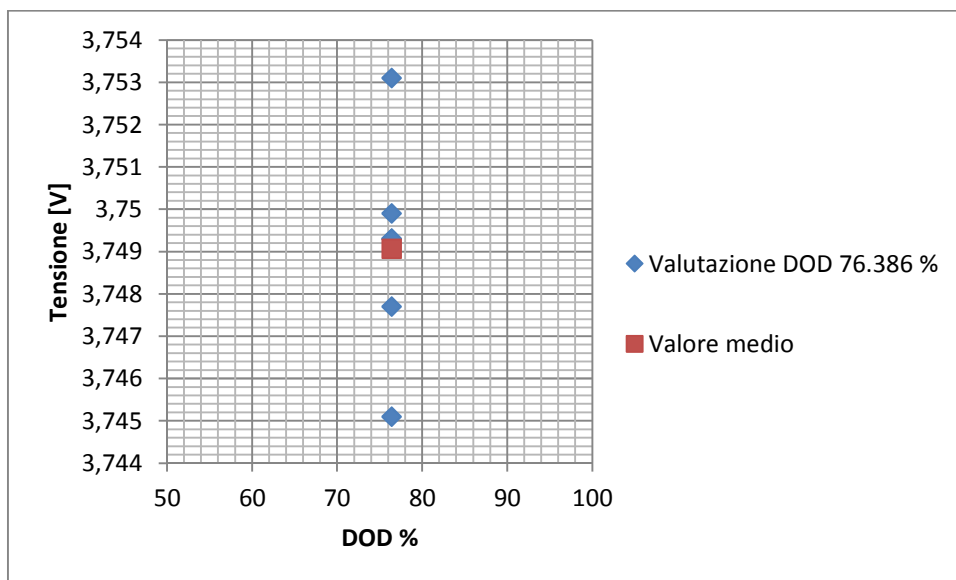


Fig. 5.25 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 61,788%

- VALORI CON UNA PROFONDITÀ DI SCARICA PARI A 76.386%, Fig. 5.26



	DOD %	V[V]
	76,386	3,7477
	76,386	3,7531
	76,386	3,7493
	76,386	3,7451
	76,386	3,7499
	76,386	3,7493
Valore medio	76,386	3,7491
Deviazione Standard %		0,0702
Errore medio positivo %		0,1076
Errore medio negativo %		0,1058

Fig. 5.26 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 76,386%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore massimo positivo e dell'errore max negativo

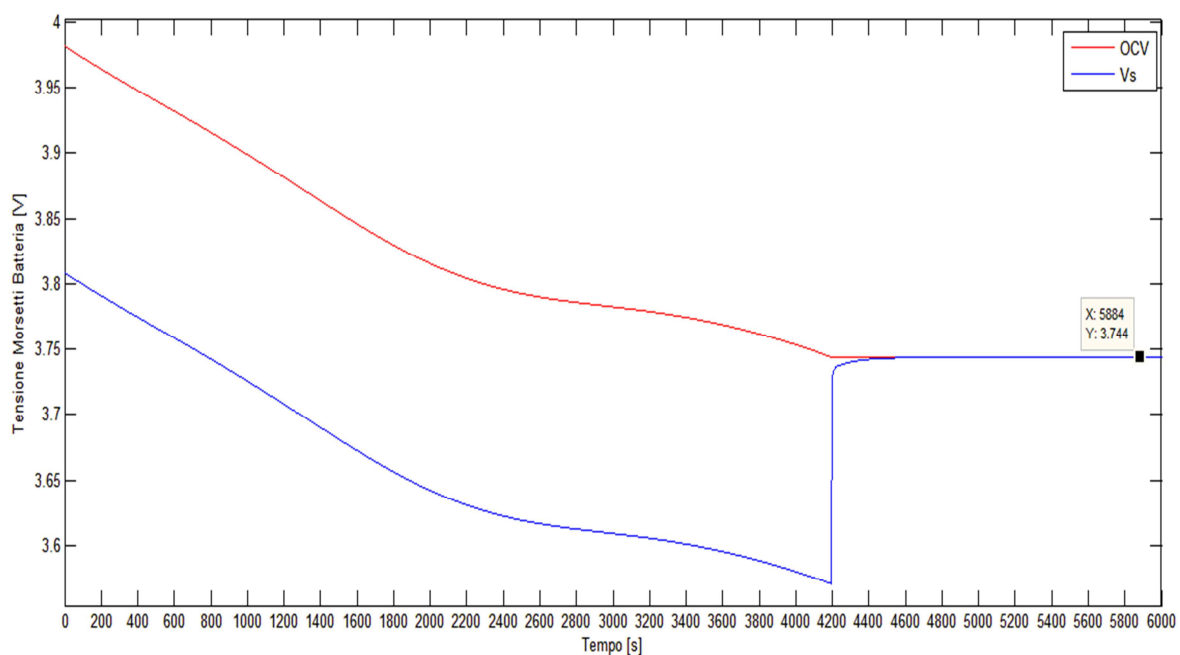
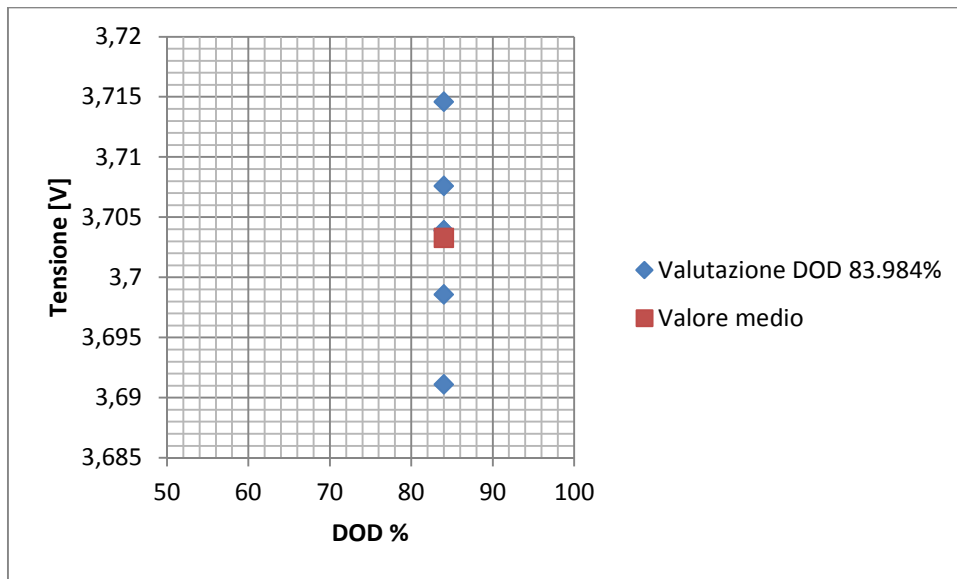


Fig. 5.27 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 76,386%

- VALORI CON UNA PROFONDITÀ DI SCARICA PARI A 83.984%, Fig. 5.28



	DOD %	V[V]
	83,984	3,6986
	83,984	3,7146
	83,984	3,7076
	83,984	3,6911
	83,984	3,7039
	83,984	3,7039
Valore medio	83,984	3,7033
Deviazione Standard %		0,2153
Errore medio positivo %		0,3056
Errore medio negativo %		0,3290

Fig. 5.28 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 83,984%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo e dell'errore max negativo

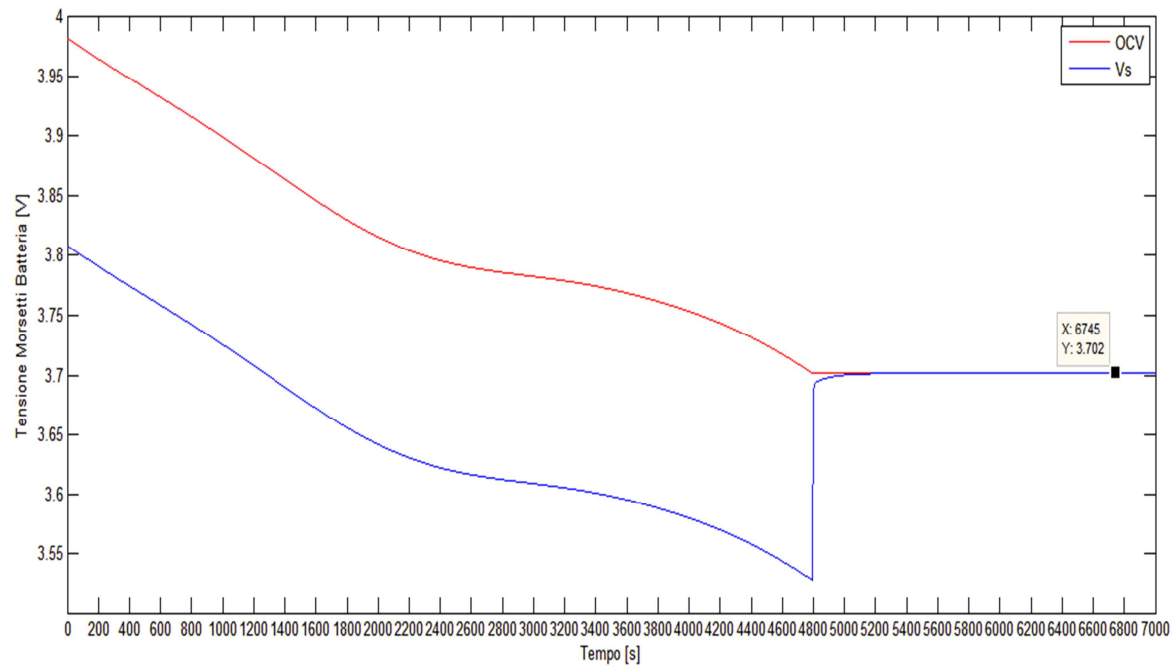
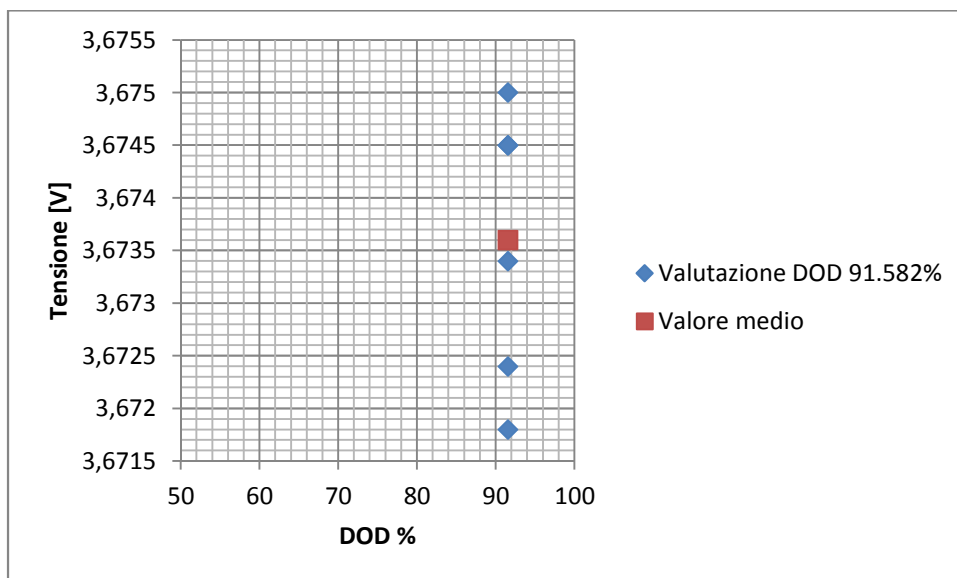


Fig. 5.29 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 83,984%

- VALORI CON UNA PROFONDITÀ DI SCARICA PARI A 91.582%, Fig. 5.30



	DOD %	V[V]
	91,582	3,6718
	91,582	3,675
	91,582	3,6745
	91,582	3,6724
	91,582	3,6734
	91,582	3,6745
Valore medio	91,582	3,6736
Deviazione Standard %		0,0351
Errore medio positivo %		0,0381
Errore medio negativo %		0,0490

Fig. 5.30 – Valori di tensione nel punto con DOD pari a 91.582%, con valutazione della deviazione standard, dell'errore max positivo e dell'errore max negativo

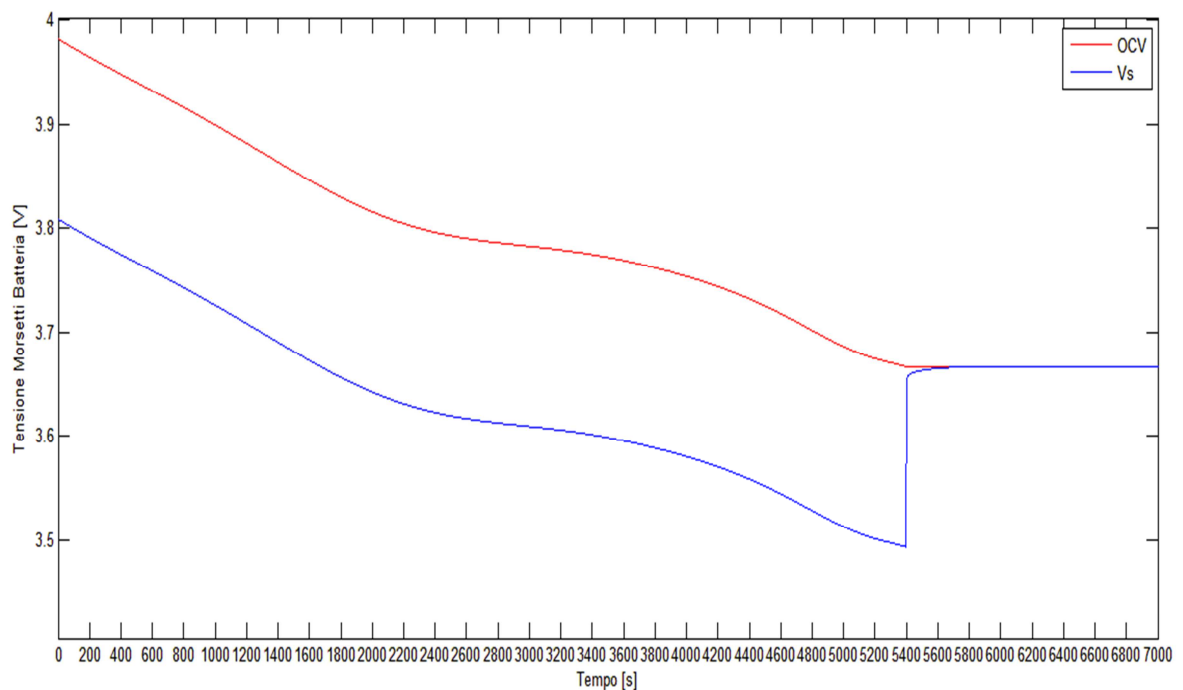


Fig. 5.31 – Andamento della simulazione con Simulink, con una corrente pari a 3,1A, ed apertura con DOD 91,582%

Come si può notare errori e deviazioni standard così contenute sono molto soddisfacenti. In più risultati di questo tipo permettono di trarre conclusioni con una visuale più macroscopica, guardando il problema dal punto di vista del veicolo elettrico. In conclusione quindi un veicolo elettrico, che effettua un percorso stradale qualsivoglia, farà scaricare la propria batteria con differenti correnti. Quando l'utente lo riterrà opportuno potrà recarsi in una stazione di ricarica e la colonnina riuscirà a capire lo stato residuo di carica all'interno della batteria leggendo direttamente la tensione che sarà presente ai morsetti della batteria stessa. Come dimostrato nei risultati appena presentati.

## **6. La gestione delle cariche con il Green Up Manager di Bticino**

### **6.1 Introduzione**

In questo capitolo si vuole far luce sulle problematiche reali, ma soprattutto attuali, che possono sorgere nella gestione della carica contemporanea di più veicoli elettrici. Come già preannunciato nel capitolo precedente una colonnina di ricarica deve essere in grado di ospitare in carica un qualunque tipo di veicolo, ciò preclude che una colonnina possa avere requisiti specifici per ogni veicolo. Come veicolo non si deve pensare ai soli modelli di automobili in commercio, ma bisogna pensare che una stazione di ricarica può ospitare anche scooter, furgoni, biciclette elettriche oppure un qualunque altro tipo di veicolo green, in grado di effettuare una ricarica della propria batteria. Ciò che si vuole affrontare in questo capitolo è come convivono questi vari tipi di veicoli e come devono essere gestiti durante la ricarica. Per arrivare a esplicitare ciò, è doveroso introdurre questo capitolo con una sintesi dei metodi di ricarica, e dei tipi di prese in commercio. Una domanda che può nascere spontanea, è perché si devono fare così tante distinzioni tra le varie prese e le varie modalità di ricarica? La risposta sta nel fatto che solo alcune di queste modalità di ricarica accettano una gestione smart dei propri accessi. In più perché il mondo dei veicoli elettrici è in piena evoluzione, e ciò non ha permesso di stabilire degli standard internazionali che consentano di definire in modo univoco le modalità di ricarica, e la comunicazione tra il veicolo e la colonnina. Quindi nasce l'esigenza di sviluppare sistemi adattativi che permettono di gestire varie situazioni, così da poter affermare al meglio il mercato di questi innovativi veicoli e da poter spingere in futuro uno sviluppo di uno standard univoco ed internazionale.

## 6.2 Tipologie e modalità di ricarica dei veicoli elettrici

Come già annunciato nel capitolo precedente si deve stendere una breve introduzione sulle modalità di ricarica dei veicoli. Per cercare di sviluppare la mobilità elettrica è di fondamentale importanza la realizzazione di una rete di punti di ricarica capillare, per riuscire a fornire la carica necessaria per effettuare il tragitto desiderato. Si deve predisporre una gamma di stazioni di ricarica adatte sia a un punto di ricarica pubblica che ad un punto di ricarica privato. In più in commercio vi sono numerosi veicoli, di numerosi diversi costruttori, e ciò ha portato a creare diversi tipi di prese per la ricarica dei veicoli. Per non creare una moltitudine di ricariche differenti e quindi non riuscire ad imporre adeguati standard sono state create norme che regolamentano i modi e le tipologie di ricarica dei veicoli [33]. I modi di ricarica sono indicati nella norma IEC 61851-1, la quale esplicita che le modalità di ricarica sono 4:

- MODO 1 – La ricarica può avvenire con una presa domestica o industriale, non creata appositamente per la ricarica dei veicoli elettrici. Una ricarica di questo tipo è ammessa esclusivamente in ambienti privati con corrente massima di 16A. La limitazione della corrente porta alla possibilità di effettuare le sole ricariche lente, con un tempo compreso tra le 6 e le 8 ore.
- MODO 2 – Anche questa modalità la ricarica può avvenire con una presa domestica o industriale, non apposta alla ricarica di soli veicoli elettrici. Come per il modo 1, con la differenza che è presente un sistema di controllo denominato Control Box, che garantisce la sicurezza delle operazioni durante la ricarica. Questa funzione aggiuntiva permette l'utilizzo di questo sistema anche nelle applicazioni pubbliche oltre che a quelle private. Anche per questo utilizzo, siccome si utilizzano prese industriali o domestiche la limitazione della corrente massima è posta a 16 A, quindi i tempi di ricarica si limitano a 6-8 ore.
- MODO 3 – La ricarica avviene tramite una presa dedicata esclusivamente per la ricarica di veicoli elettrici. Essa è formata da connettori specifici, e da un sistema di sicurezza PWM. La limitazione della corrente è posta a 63 A, con una tensione massima di 400V. Ciò permette ricariche anche rapide, fino a 30 minuti.



- MODO 4 – Questa modalità è esclusivamente in corrente continua, con un massimo di 200A, 400V. Una modalità di questo tipo permette la ricarica ultra rapida in 5-10 minuti.

Sempre la stessa norma fa riferimento a tre diversi tipi di connessione tra veicolo e stazione di ricarica:

- CASO A – Il cavo flessibile che collega il veicolo alla rete è permanentemente attaccato al veicolo;
- CASO B – Il cavo flessibile per la ricarica del veicolo è connesso sia al veicolo che alla rete per mezzo di connettori;
- CASO C – Il cavo flessibile per la ricarica del veicolo è permanentemente attaccato alla stazione di ricarica.

Come si può notare la norma ha definito le modalità di ricarica, ma non ha definito un unico standard di connettore per ogni modalità. Per questo motivo sono nate alleanze tra diversi costruttori e veicoli elettrici, formando diversi tipi di connettori per il terzo ed il quarto modo di ricarica. Logicamente solo per il terzo ed il quarto modo di ricarica perché per il primo ed il secondo le modalità solo le stesse già commercializzate per gli usi civili ed industriali. I principali connettori in commercio per il terzo modo di ricarica sono:

- CONNETTORE TIPO 1 - YAZAKI - Formato dalla Multinazionale giapponese Yazaki, Fig. 6.1, [34]. Questo tipo di connettore sopporta fino ad una tensione di 250V in AC con correnti fino a 30A. È formato da due conduttori di potenza, dal conduttore di protezione e dai conduttori di segnale (CP – Control Pilot, PP – Proximity Pilot). Un connettore di questo tipo può sopportare la sola ricarica monofase con una potenza massima di 7.5 kW.

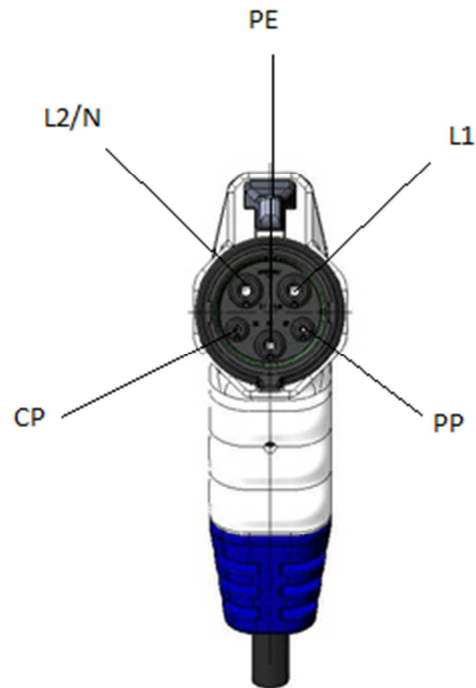


Fig. 6.1 – Connettore Yazaki

- CONNETTORE TIPO 2 - MENNEKES – È stato sviluppato in Germania ed è un connettore in grado di effettuare una ricarica monofase e trifase con una potenza fino a 44 kW con correnti massime di 63 A, [35] Esso è formato dai 3 conduttori di fase, dal conduttore di neutro, dal conduttore di protezione, e dai conduttori di segnale (CP, PP), Fig. 6.2.

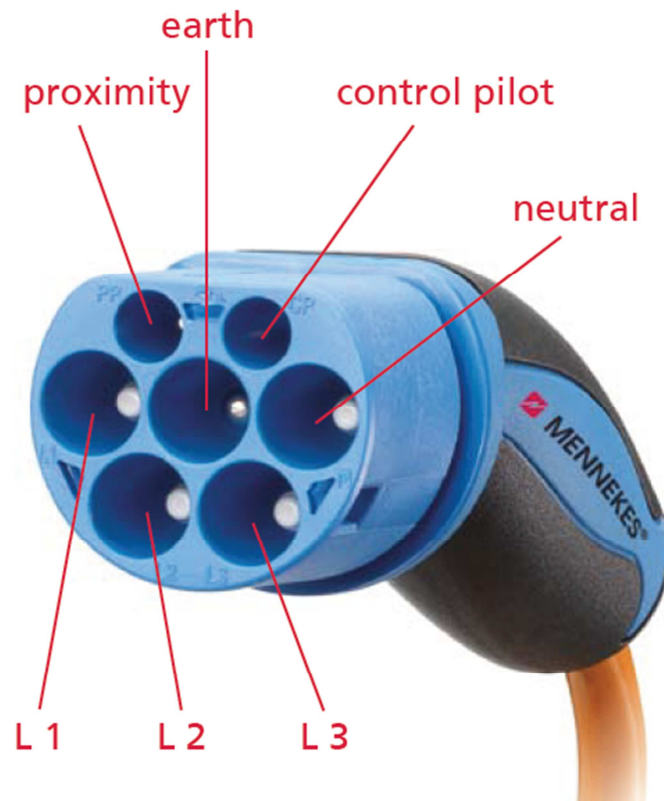


Fig. 6.2 – Connettore Mennekes

- CONNETTORE TIPO 3 - EV PLUG – Connettore sviluppato in Italia, da EV Plug Alliance creata da un'alleanza tra il Gruppo Legrand, SCAME Parre S.p.a. e Schneider Electric. Il connettore è in grado di effettuare la ricarica sia monofase che trifase, con una potenza massima di 22 kW e 32 A, [36]. Come per la Mennekes è composta dalle 3 fasi, dal neutro, dal conduttore di protezione, e dai conduttori di segnale (CP, PP), Fig. 6.3.

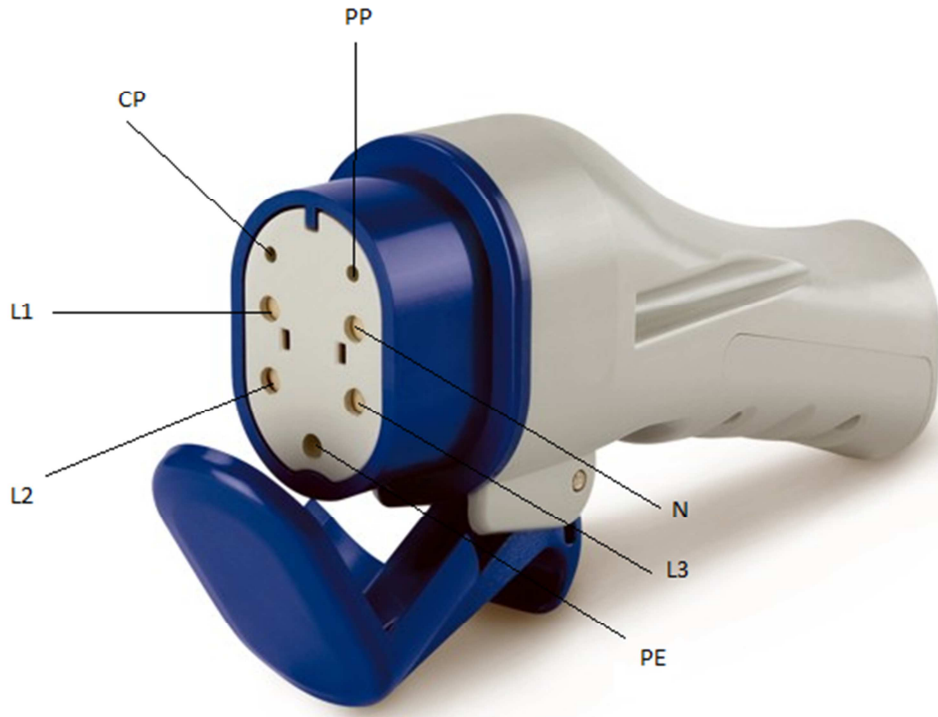


Fig. 6.3 – Connettore EV Plug Alliance

Sono stati chiamati di tipo 1, 2, 3 non in modo casuale, ma definiti dalla sempre nella norma IEC, la distinzione tra questi diversi modelli risiede nella sicurezza intrinseca di ognuno. Come per il modo 3 vi sono delle diverse soluzioni per il modo 4, cioè per la ricarica rapida in corrente continua. Le soluzioni ad oggi più utilizzate sul mercato sono le seguenti:

- CONNETTORE MENNEKES DC HIGH COMBO – È una presa in grado di effettuare la ricarica rapida in corrente continua. I limiti in potenza sono fissati a 140 kW con una corrente massima di 200 A, [37]. La disposizione dei contatti è indicata nella seguente figura, Fig. 6.4.



Fig. 6.4 – A sinistra presa Mennekes completa di ricarica DC HIGH, e ricarica trifase; a destra spina per la sola ricarica Mennekes DC HIGH

- CONNETTORE CHADEMO – Connettore per la sola ricarica ultra rapida DC. Nata grazie all'associazione tra Toyota, Nissan, Mitsubishi, Fuji, e Tokyo Electric Power Company, [38]. Esso è in grado di effettuare ricariche fino a 62.5 kW, con correnti massime di 125 A, [39]. Esso è formato esclusivamente dai due conduttori di potenza e dai connettori di segnale, Fig. 6.5, [40].

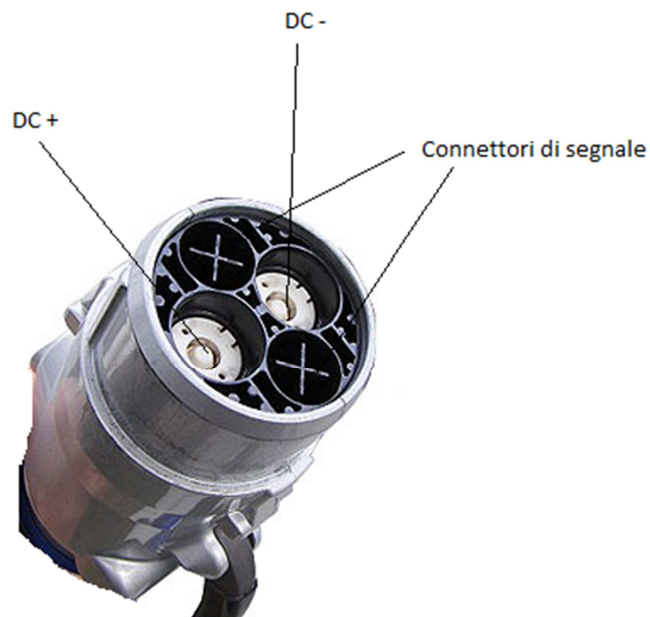


Fig. 6.5 – Connettore Chademo per la ricarica rapida DC

Prima di continuare esplicitando le scelte effettuate da Bticino e quindi focalizzarci sulla gestione di esse, si vuole fare una piccola parentesi per spiegare la ricarica ultra rapida dei veicoli. Fino ad ora è stata presa come definizione che la ricarica ultra rapida è fatta esclusivamente in DC. Ora si vuole spiegare il motivo che obbliga la ricarica ad essere in corrente continua per ricaricare il veicolo in poco tempo. Per far ciò si deve analizzare la stazione di ricarica: una colonnina di ricarica che sia ad uso privato o pubblico, in corrente alternata alimenta il veicolo elettrico direttamente in AC, e lascia il compito al veicolo di trasformare l'energia in DC, Fig. 6.6. Avere il convertitore AC-DC a bordo del veicolo limita la potenza trasferibile dalla colonnina al veicolo. Questo perché un convertitore installato a bordo del veicolo, deve avere un costo limitato, per far sì che l'acquisto del veicolo sia accessibile ad una più larga fascia di clienti, ed anche un peso ed un ingombro contenuti. Quindi, per concludere, una colonnina AC può al limite fornire una potenza al veicolo pari a quella massima di dimensionamento del convertitore, e ciò non permette tempi di ricarica ultra rapidi. Per non avere limiti sui tempi di ricarica, e cioè permettere la ricarica anche con tempi rapidissimi, si deve procedere con la fornitura di energia direttamente in corrente continua. Così si svincolano i limiti dimensionali sia fisici che economici del convertitore a bordo del veicolo, installandolo direttamente nella stazione di ricarica. Lo schema di principio si può notare nella Fig. 6.7.

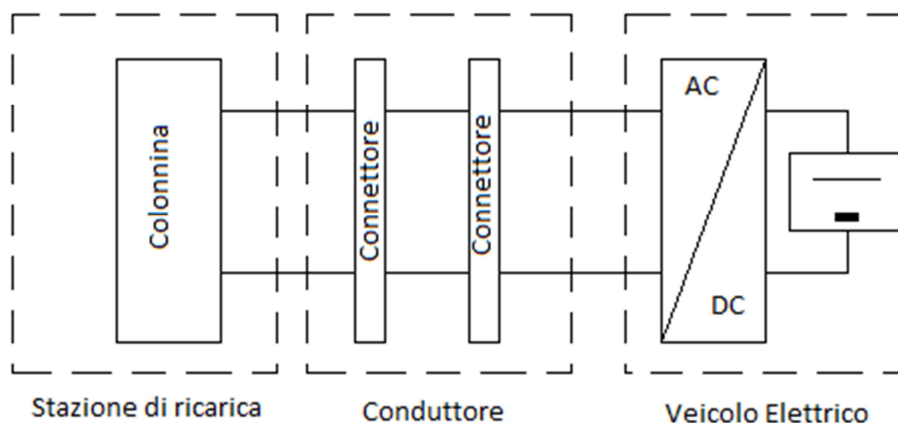


Fig. 6.6 – Schema di funzionamento tipico di una stazione di ricarica di un veicolo elettrico in corrente alternata monofase<sup>23</sup>

<sup>23</sup> Una colonnina trifase non presenta sostanziali modifiche perché ciò che varierà sarà l'alimentazione in trifase e il convertitore trifase lato AC.

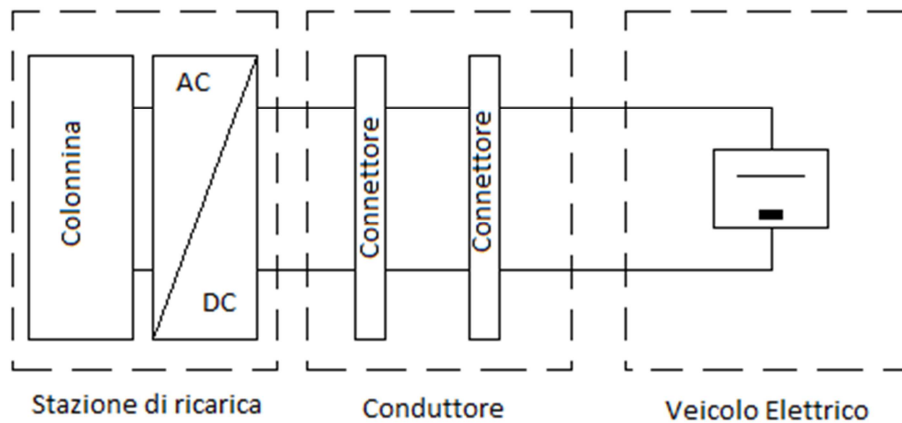


Fig. 6.7 – Schema di principio tipico di una stazione di ricarica per un veicolo elettrico in corrente continua

### 6.3 Soluzioni adottate dal gruppo Bticino

Bticino è un'azienda italiana operante nel settore metalmeccanico dal 1936. Nel 1989 è entrata a far parte del gruppo Legrand che opera in più di 60 Paesi nel Mondo. Esso ha sempre seguito le esigenze di mercato adattandosi ad ogni cambiamento, tanto da cogliere l'opportunità e sviluppare una propria gamma di prodotti atti alla ricarica ed alla gestione dei veicoli elettrici. Il Green Up offre una gamma di soluzioni adatta a tutte le esigenze di ricarica, dalla ricarica privata a quella pubblica. Per sviluppare un'offerta adeguata alle esigenze di mercato si sono dovute fare delle scelte sui connettori da impiegare [41]:

- Connettore per la ricarica del modo 1, Fig. 6.8. Un connettore per il modo 1 è una semplice presa Schuko, con una modifica sostanziale che limita la corrente circolante. La limitazione è dovuta dal fatto che molti veicoli, che ricadono nel CASO A, possiedono un cavo di alimentazione che è in grado di sopportare al massimo 14 A, mentre una normale Schuko è in grado di erogare al fino a 16 A, e siccome una presa di questo tipo non è in grado di limitare la corrente, perché è sprovvista di una logica di controllo, si è dovuto limitare la corrente cambiando la propria struttura interna.



Fig. 6.8 – Presa Modo 1 adottata da Bticino

- Connettore per il modo 2. Le prese non sono diverse dal modo 1, con l'aggiunta del Control Box sul cavo.
- Connettore per il modo 3. Facente parte del gruppo Legrand la soluzione per questo modo di ricarica è ricaduta sul connettore EV Plug.

Con queste informazioni si può procedere con presentare l'offerta delle stazioni di ricarica Bticino. Bisogna ricordare che questa trattazione iniziale è molto utile per capire come deve avvenire la gestione delle ricariche. Perché, come si sta intuendo, si deve essere in grado di gestire la ricarica contemporanea di qualunque veicolo, anche quelli con accesso a connettori non Smart. Un punto di ricarica deve avere caratteristiche molto diverse in funzione dell'uso che deve esserne fatto. Basti pensare a tutti i sistemi di sicurezza che un punto di ricarica pubblica deve avere per consentire la corretta ricarica senza che atti vandalici o intemperie la interrompano. Bticino propone diverse soluzioni adattabili a qualunque sito in cui si voglia installare un punto di ricarica. Esse sono:

- COLONNINA GREEN UP – LUOGHI RESIDENZIALI, diverse soluzioni:
  - Abitazione indipendente:
    - Il punto di ricarica più semplice prevede un accesso al modo 1,2; installando una soluzione come mostrata in Fig. 6.9. In questa figura si è voluto mostrare uno schema più completo riguardante



la ricarica di un veicolo in modo 2. Con potenza pari a 3 kW, e corrente di 14 A.

- Il punto di ricarica con accesso al modo 3 prevede una presa EV Plug, ed una presa schuko, Fig. 6.10. Con potenza pari a 3.5 kW, e corrente di 16 A.
- Condomini o abitazioni semindipendenti:
  - Il punto di ricarica con accesso al modo 1,2 è formato da una Schuko con accesso personalizzato, Fig. 6.11. È l'unica soluzione possibile, perché non avendo una logica Smart, deve essere direttamente connesso al contatore della persona proprietaria del punto di utilizzo. Quindi quel punto di ricarica è ad uso completamente privato.
  - Il punto di ricarica con acceso al modo 3 è identica alla soluzione illustrata in Fig. 6.10, con l'aggiunta di un lettore badge, consentendo il corretto accesso alla ricarica e la fatturazione dell'energia alla persona che la sta utilizzando.
- COLONNINA GREEN UP – PARCHEGGI PUBBLICI O AZIENDALI

Si propone una soluzioni con più punti di ricarica, in grado di caricare due veicoli in contemporanea, uno per ogni lato. Si è adottata una soluzione per ricaricare il veicolo tramite il modo 1,2, e il modo 3, per ogni lato, Fig. 6.12. In queste soluzioni le potenze di carica sono le seguenti:

  - Soluzione monofase, con potenza 3.5 kW, 16 A
  - Soluzione trifase, con potenza 22kW, 32 A

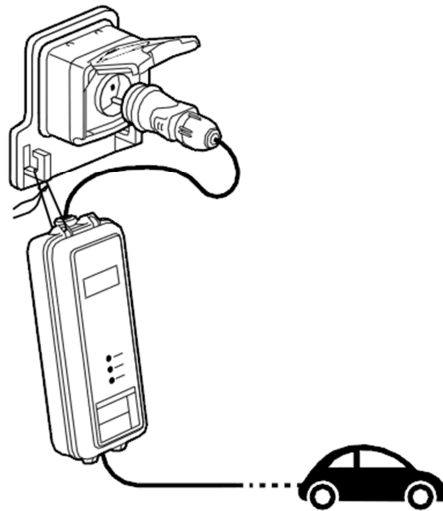


Fig. 6.9 – Modo 2 di ricarica con Control Box



Fig. 6.10 – Modo di ricarica 3, presa EV Plug, più presa Schuko, per uso privato residenziale



Fig. 6.11 – Accesso per la ricarica secondo il modo 1 e 2, con accesso limitato, quindi adatto ad essere installato negli spazi comuni residenziali, o similari



Fig. 6.12 – Colonnina per uso pubblico, con due accessi per ogni lato

#### 6.4 Logica di gestione delle cariche

In questo paragrafo si vuole iniziare a parlare del problema delle ricariche contemporanee di più veicoli. Lo scopo di questa trattazione è creare un modello generico da utilizzare nella gestione della ricarica di più veicoli. Per capire come crearlo e che caratteristiche deve avere si deve capire come è la logica di gestione delle cariche del Green Up Manager. In Fig. 6.13, si vuole mostrare un possibile impianto preesistente oppure di nuova generazione che vuole installare vari punti di ricarica per i veicoli elettrici. Un impianto che vuole rendere disponibili dei punti di ricarica, deve avere una gestione dei carichi che permette la coesistenza tra i carichi classici ed la ricarica dei veicoli.

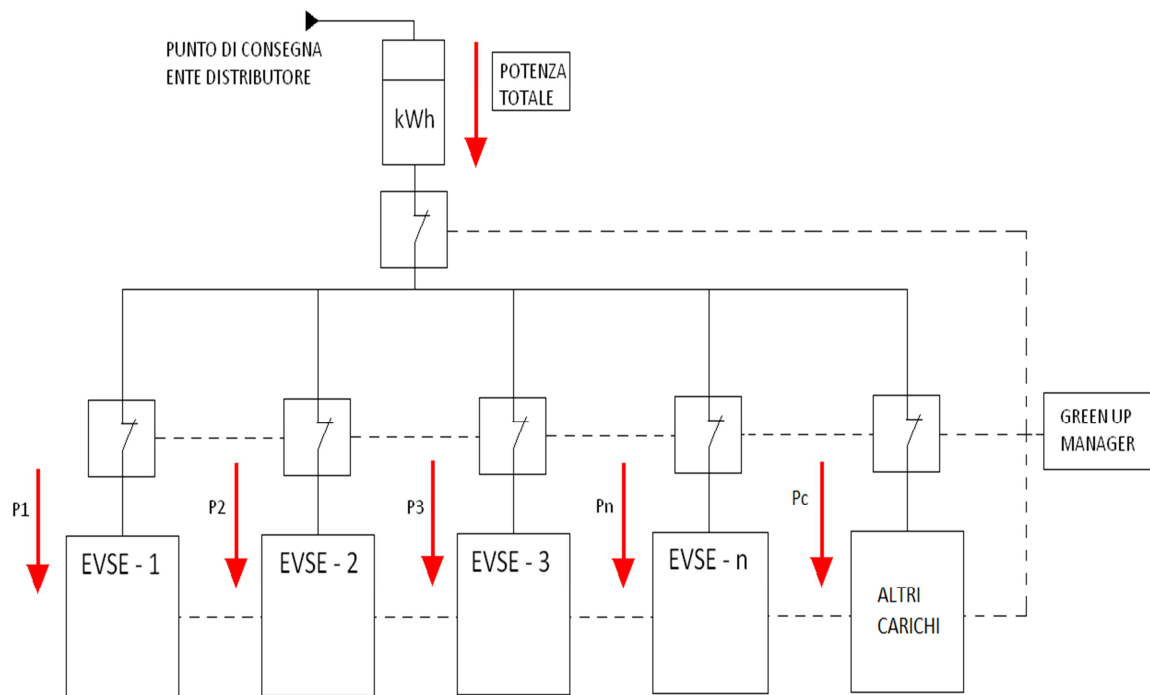


Fig. 6.13 – Schema di principio per un impianto con alcuni punti di ricarica per i veicoli

Analizziamo la Fig. 6.13, cercando di spiegare come può avvenire una gestione delle cariche. Il Green Up Manager deve scegliere come gestire i flussi di potenza senza far eccedere la potenza di contratto con l'ente distributore. Per far ciò si devono imporre dei vincoli da rispettare. Con il termine gestione della carica si vuole intendere, oltre al raggiungimento in modo corretto del termine della carica, anche la fornitura delle informazioni all'utente su come sta procedendo la ricarica del proprio veicolo. Per far ciò sono necessarie alcune e basilari informazioni sulla batteria da gestire:

1. Lo stato di carica iniziale della batteria;
2. La capacità nominale della batteria;
3. La tensione massima e minima applicabile alla batteria;
4. La corrente minima applicabile alla batteria;
5. La resistenza interna della batteria;

Oltre a queste informazioni il gestore dell'impianto deve configurare dei limiti:

- a. La minima carica da garantire ad ogni veicolo;
- b. Le soglie di partizione della corrente, cioè i livelli discretizzati con i quali verrà variata la corrente assorbita dalle colonnine.

Ora si vuole analizzare il motivo della scelta di queste variabili, e come si riesce a riceverle. Le informazioni dal punto 1 al punto 6 dovranno essere inviate dalla macchina alla colonnina, tramite protocolli di comunicazione, oppure immesse direttamente dall'utente sul display della colonnina nel caso in cui la comunicazione fosse assente. Tra le varie informazioni si nota che vi è presente anche lo stato iniziale di carica. Questo punto è la variabile più importante per la gestione dei veicoli, perché se non ci fosse essa la macchina dovrebbe essere considerata sempre con la batteria scarica e quindi non sarebbe possibile gestire le cariche distribuendo la potenza uniformemente. Per questo motivo vi è una possibilità in più per ricevere con certezza il valore dello stato di carica iniziale: nel caso in cui esso non sia direttamente visualizzata sul cruscotto del veicolo; nel caso in cui la macchina sia priva di una comunicazione tra veicolo e colonnina, oppure essa sia fuori uso; si è in grado di capire lo stato residuo di carica leggendo direttamente la tensione di circuito aperto sui morsetti della batteria stessa, come dimostrato nel capitolo precedente. Quindi grazie allo stato iniziale della batteria e grazie alle altre variabili richieste si deve procedere con la costruzione di un modello in grado di definire i tempi previsti per la ricarica della batteria ed a che livello di carica è arrivata la batteria quando l'utente decide di riprendere il veicolo.

#### 6.4.1 Scelta di un modello circuitale adattabile a più batterie al Litio

Per creare un modello riutilizzabile per ogni veicolo, ma soprattutto gestibile con pochissimi parametri bisogna osservare la teoria che sta alla base della costruzione di un modello per le batterie al litio. Per far ciò si vuole fare una breve sintesi sul lavoro fatto nei capitoli precedenti. Nel quarto capitolo si è valutato un circuito complesso formato da più coppie RC in parallelo. Come si è potuto constatare si sono dovute eseguire innumerevoli prove sperimentali per la valutazione di tutti i parametri. Ora si vuole scegliere un modello facilmente gestibile e riadattabile a più batterie di veicoli elettrici. Per questo motivo si devono osservare i datasheet delle batterie dei veicoli. Da essi si può notare che oltre alla tensione massima e minima applicabile, alla corrente massima e minima, ed alla capacità nominale, vi è presente il solo valore di resistenza interna  $R_0$ . Questo implica che il modello possa essere formato dal generatore di tensione interna e dalla resistenza  $R_0$ , Fig. 6.14. Ma non può essere formato dalle altre coppie RC, perché

non si è in grado di effettuare le prove sperimentali per la loro validazione ogni qualvolta che un veicolo sia in procinto di essere caricato. Ora si può capire veramente a fondo l'utilità della scelta di allestire un capitolo così dettagliato sulla costruzione di un modello per una batteria, perché solo la presentazione di tutte le prove sperimentali che andrebbero fatte per dimensionare tutti i parametri ha permesso di mostrare quali parametri devono essere scelti per la costruzione di un modello semplice e riadattabile a più batterie.

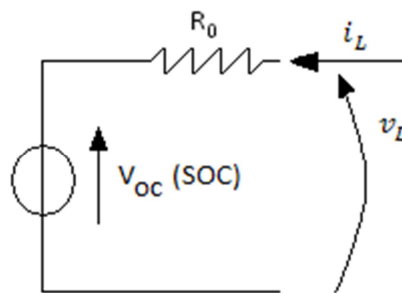


Fig. 6.14 – Circuito semplificato, qui rappresentato in configurazione carica

Una domanda che deve sorgere spontanea è come è definito l'andamento della tensione di circuito aperto in funzione dello stato di carica. Si sapeva che l'andamento era descritto da una funzione polinomiale, ma essa è incalcolabile senza tutte le prove sperimentali e soltanto con i dati in ingresso appena presentati. Per decidere come approssimare il suo andamento ci si deve concentrare sul range di tensioni massime e minime applicabili alla batteria. La soluzione al problema è l'approssimazione della curva polinomiale con una lineare che mette in evidenza come la tensione interna sia pari alla tensione minima se la batteria è allo 0% del SOC, mentre è pari alla tensione massima se essa se la batteria è al 100% del SOC. Quindi si può pensare di approssimare l'andamento della tensione di circuito aperto in funzione del SOC con una dipendenza lineare, Fig. 6.15.

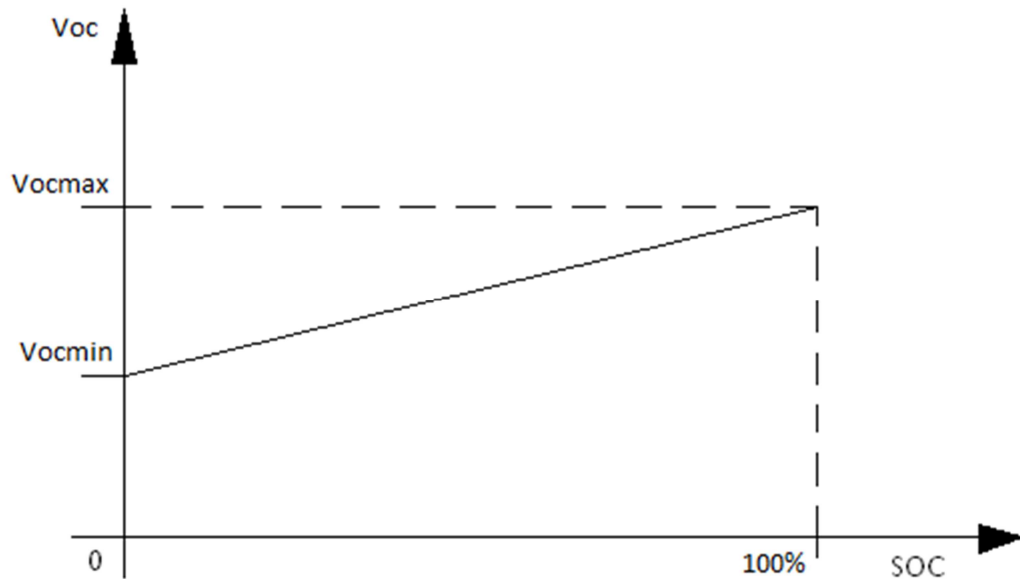


Fig. 6.15 – Andamento tensione interna della batteria in funzione dello stato di carica

Ciò comporta che la funzione che lega la tensione allo stato interno è la seguente:

$$V_{oc} = V_{ocmin} + [SOC(V_{ocmax} - V_{ocmin})]$$

Si ricorda che l'espressione del SOC è la seguente:

$$SOC = SOC(0) + \frac{\int_0^T i(t)dt}{Qn}$$

Pensando a cosa deve simulare il circuito, e cioè la sola carica della batteria, ci soffermiamo sulle modalità di ricarica di una batteria al Litio. Come già spiegato nel primo capitolo di questa tesi, la carica è composta da due parti:

- Tratto a corrente costante. Si impone una corrente costante fino al raggiungimento della tensione massima applicabile ai morsetti della batteria.
- Tratto a tensione costante. Una volta raggiunta la tensione massima, non si impone più la corrente, ma viene applicata la tensione pari al valore massimo lasciando diminuire la corrente fino a quando essa raggiunga il valore minimo di corrente applicabile.

L'andamento di queste variabili è visibile nella Fig. 6.16.

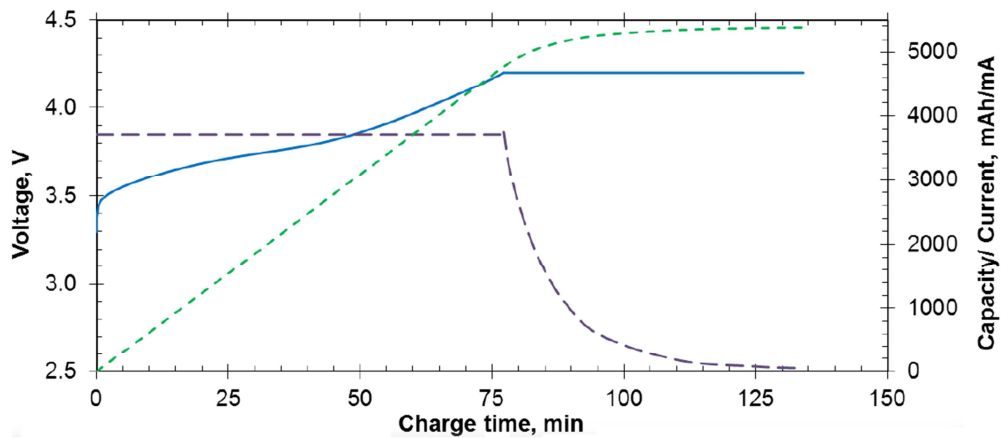


Fig. 6.16 – Andamento della tensione, della corrente e dello stato di carica, durante la carica di una batteria al Litio

Il circuito si comporterà in due modi differenti. Quindi vi saranno due risoluzioni circuitali.

#### CORRENTE IMPRESSA

Nel primo tratto si può vedere il circuito collegato ad un generatore ideale di corrente, Fig. 6.17

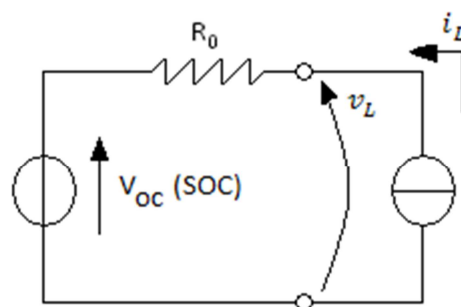


Fig. 6.17 – Modello circuitale che modella il primo tratto a corrente impressa



Si procederà quindi nel ricavare lo stato di carica dalla seguente espressione:

$$SOC(T1) = SOC(0) + \frac{\int_0^T i_L(t) dt}{Qn} = SOC(0) + \frac{i_L * T1}{Qn}$$

Una volta ricavato lo stato di carica all'istante T1, si ricaverà la tensione  $V_{oc}(T1)$  dalla seguente espressione:

$$V_{oc}(T1) = V_{ocmin} + [SOC(T1)(V_{ocmax} - V_{ocmin})]$$

L'ultimo passo da effettuare è calcolare la tensione ai morsetti della batteria utilizzando la legge di kirchhoff alla maglia:

$$v_L(T1) = R_0 i_L(T1) + V_{oc}(T1)$$

Di conseguenza si continuerà con questo metodo risolutivo fino a quanto non si raggiunge la tensione massima ai morsetti della batteria. Una volta raggiunta si applicherà un generatore di tensione ideale ai morsetti della batteria e quindi il metodo risolutivo sarà differente.

#### TENSIONE IMPRESSA

Applicando la tensione ai morsetti della batteria, Fig. 6.18, la principale incognita è la corrente. Qui però la corrente non è costante e quindi non si può considerare l'integrale

della corrente come il prodotto tra la corrente ed il tempo. Quindi la soluzione è discretizzare l'integrale al secondo, trasformandolo in una sommatoria.

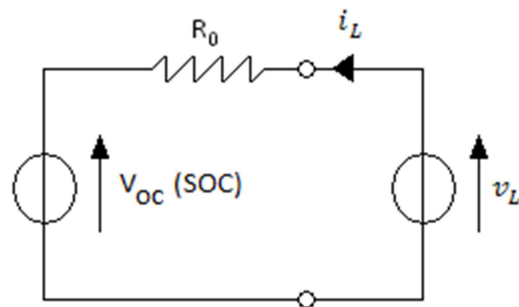


Fig. 6.18 – Modello circuitale che modella il secondo tratto a tensione impressa

Per risolvere il circuito, bisogna far riferimento ad un istante di tempo  $\Delta t$ , dove la corrente viene considerata costante. Partendo dalla legge di Kirchhoff maglia si ricava la corrente  $i_L(\Delta t)$ :

$$i_L(\Delta t) = \frac{v_L(\Delta t) - V_{oc}(\Delta t)}{R_0}$$

In questa equazione però non è noto il valore della tensione  $V_{oc}(\Delta t)$ , ma si conosce come esso varia in funzione dello stato di carica, e quindi come varia in funzione della corrente. Sostituiamo in questa espressione al posto di  $V_{oc}(\Delta t)$ , le seguenti espressioni:

$$V_{oc}(\Delta t) = V_{ocmin} + [SOC(\Delta t)(V_{ocmax} - V_{ocmin})]$$

$$SOC(\Delta t) = SOC(0) + \frac{i_L(\Delta t) * \Delta t}{Qn}$$

Si ottiene quindi

$$i_L(\Delta t) = \frac{v_L(\Delta t) - \{V_{ocmin} + [SOC(\Delta t)(V_{ocmax} - V_{ocmin})]\}}{R_0}$$

$$i_L(\Delta t) = \frac{v_L(\Delta t) - \{V_{ocmin} + \left[ (SOC(0) + \frac{i_L(\Delta t) * \Delta t}{Qn}) * (V_{ocmax} - V_{ocmin}) \right]\}}{R_0}$$

Questa espressione contiene un'unica incognita che è  $i_L(\Delta t)$ , ricavandola si ottiene:

$$i_L(\Delta t) = \frac{v_L(\Delta t) - V_{ocmin} - [SOC(0) * (V_{ocmax} - V_{ocmin})]}{\frac{\Delta t}{Qn} (V_{ocmax} - V_{ocmin}) + R_0}$$

Anche in questo caso si continuerà la risoluzione del circuito con questo metodo fino a che la corrente non raggiunga il valore minimo applicabile. Questa soluzione proposta riesce a simulare la carica della batteria con delle variabili in ingresso di semplice comprensione ma soprattutto presenti su qualunque datasheet di batterie al Litio. Nel prossimo paragrafo si vuole simulare il circuito per capire i risultati ottenuti da una trattazione di questo tipo.

#### 6.4.2 Simulazione circuitale del modello semplificato

La simulazione circuitale viene effettuata con il software MATLAB, discretizzando il passo di integrazione di 1 secondo. Gli input per la simulazione sono riferiti ad un caso reale. Il pacco batterie considerato si riferisce ad una tipica utilitaria completamente elettrica. I dati di ingresso al modello sono i seguenti:

- Capacità nominale 50 Ah

- Tensione minima applicabile 242 V
- Tensione massima applicabile 397V
- Corrente minima 0.1 A
- Resistenza interna 0.1  $\Omega$

Si vuole fare un esempio sulla ricarica da parte di una colonnina trifase con potenza pari a 22kW.

Il codice MATLAB è il seguente:

```
% Costanti della batteria. Input del modello
Vocmax=397;      %V
Vocmin=242;     %V
iL=55 % Ampère
R0=0.1;        % Ohm
Qn=50;         %Ah
Qn=Qn*3600;    %As
iL_min=0.1;    %A

% stato iniziale di carica
SOC_0=0;

t_fin=30000; %s
m=1;
for k=1:t_fin

    tempo=1;
    if k == 1
        i(k)=iL;
        SOC(k)=SOC_0+(i(k)*tempo)/Qn;
        Voc(k)=Vocmin+(SOC(k)*(Vocmax-Vocmin));
        v(k)=R0*i+Voc(k);
    else
        if v(k-1) < Vocmax
            i(k)=iL;
            SOC(k)=SOC(k-1)+(i(k)*tempo)/Qn;
            Voc(k)=Vocmin+(SOC(k)*(Vocmax-Vocmin));
            v(k)=R0*i(k)+Voc(k);

        else
            tempo_cc_cv(m)=k;
            v(k)=Vocmax;
            i(k)=(Vocmax-Vocmin-(SOC(k-1)*(Vocmax-
Vocmin)))/((tempo/Qn)*(Vocmax-Vocmin)+R0);
            SOC(k)=SOC(k-1)+(i(k)*tempo)/Qn;
            Voc(k)=Vocmin+(SOC(k)*(Vocmax-Vocmin));
            m=m+1;
        end
    end
end
```

```
        if i(k) <= iL_min
            tempo_finale=k;
            break
        end

end

tempo_cc_cv=min(tempo_cc_cv);
tempo_cc_cv=tempo_cc_cv/60 % min
tempo_finale=tempo_finale/60 % min

t=[1:k];

figure(1)
plot(t,v,'linewidth',2)
grid on
title('\bfVoltage'); xlabel('Time [s]'); ylabel('Tensione morsetti
batteria [V]')

figure(2)
plot(t,Voc,'linewidth',2)
grid on
title('\bfOCV'); xlabel('Time [s]'); ylabel('Voc [V]')

figure(3)
plot(t,SOC,'linewidth',2)
grid on
title('\bfSOC'); xlabel('Time [s]'); ylabel('SOC')

figure(4)
plot(t,i,'linewidth',2)
grid on
title('\bfCorrente'); xlabel('Time [s]'); ylabel('Corrente morsetti
batteria [V]')
```

I risultati che si ottengono da una simulazione di questo tipo sono rappresentati nelle seguenti figure, Fig. 6.19, Fig. 6.20, Fig. 6.21, Fig. 6.22.

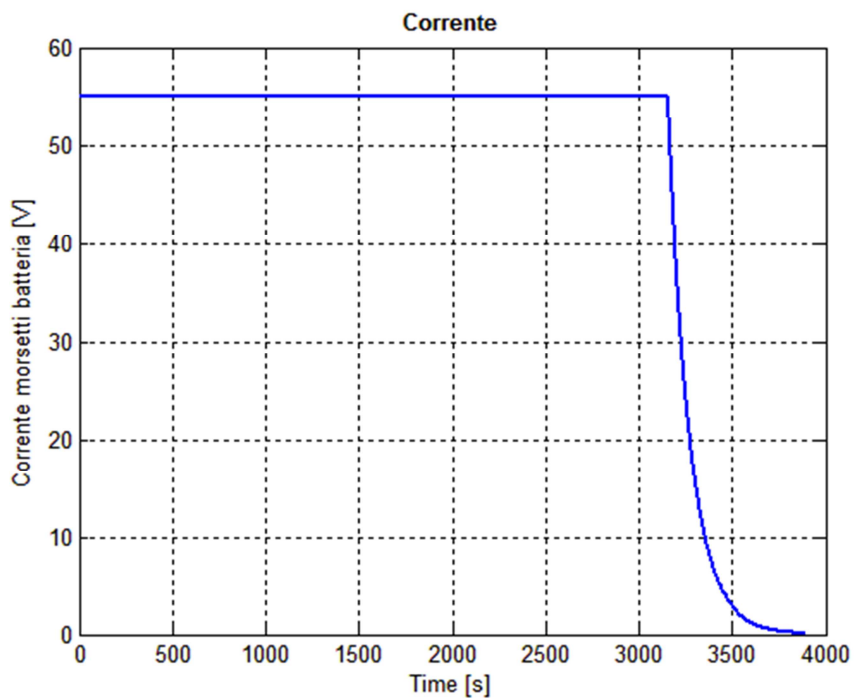


Fig. 6.19 – Andamento corrente in funzione del tempo ai morsetti della batteria per una carica completa a 22 kW

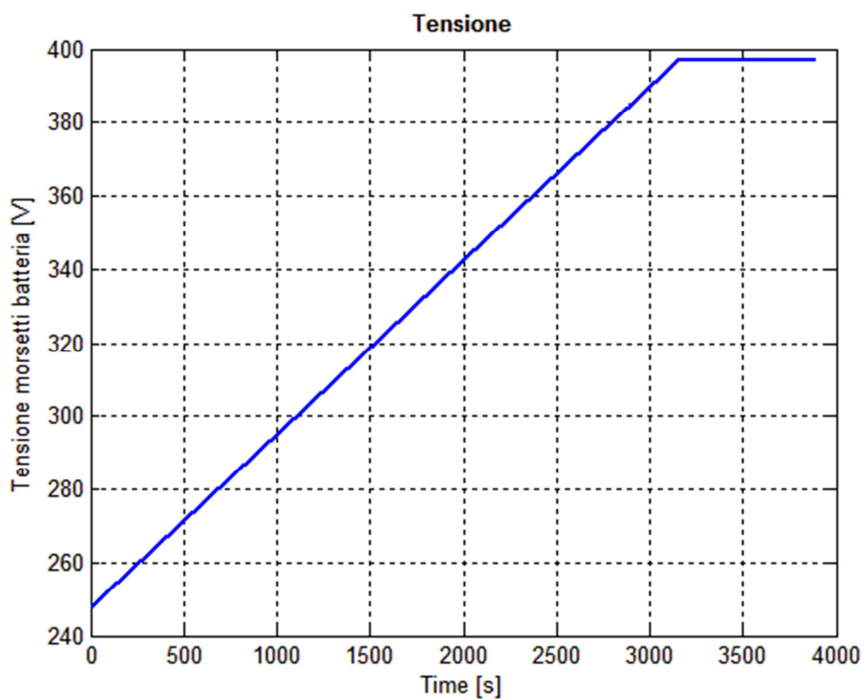


Fig. 6.20 – Andamento tensione ai morsetti della batteria in funzione del tempo per una ricarica completa a 22 kW

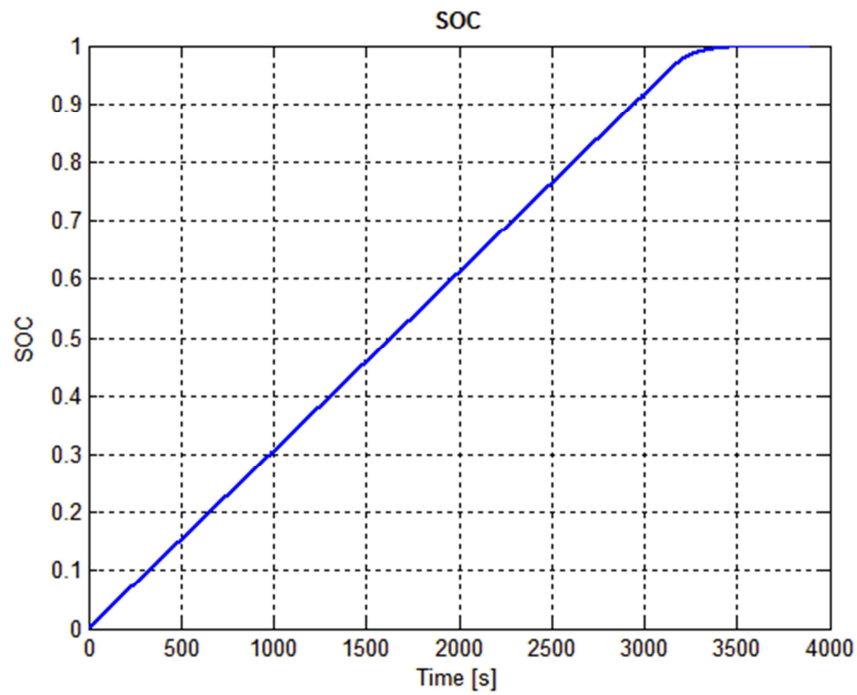


Fig. 6.21 – Andamento stato di carica della batteria in funzione del tempo, per una ricarica completa a 22 kW

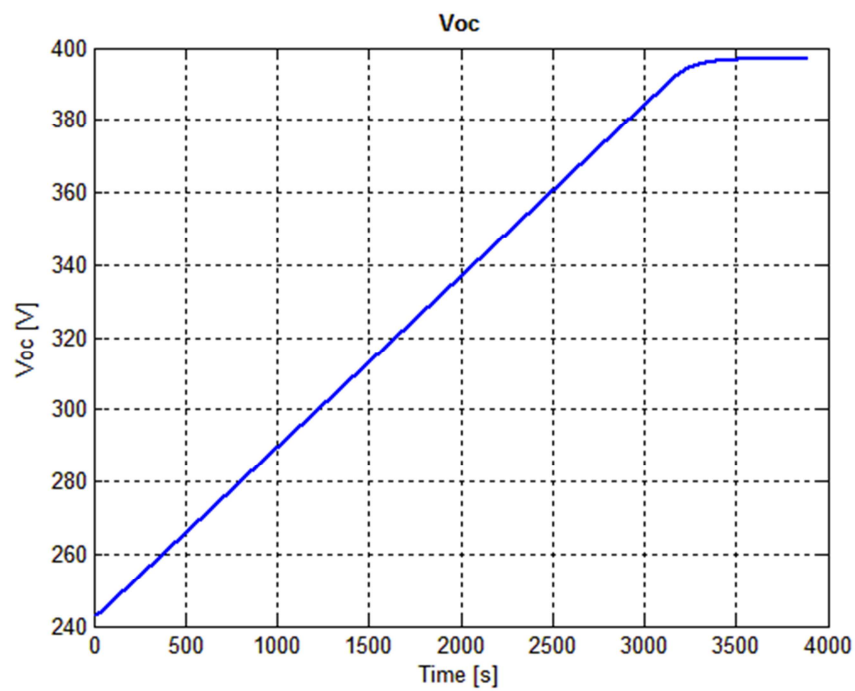


Fig. 6.22 – Andamento tensione interna della batteria in funzione del tempo, per una ricarica completa di 22 kW

Come si può notare dalle figure, l'andamento grafico rispecchia l'andamento mostrato in Fig. 6.16. Con la differenza che nel tratto a corrente costante l'andamento della tensione interna è lineare, mentre nella realtà è una funzione polinomiale. Un ulteriore confronto si può effettuare con un caso realmente testato in un progetto di sperimentazione denominato Smart Vendée. Esso è un progetto realizzato in Francia dove il gruppo Legrand è uno dei tanti partecipanti. In questa sperimentazione con in oggetto lo stesso pacco batteria, e la stessa colonnina di ricarica, i tempi per completare la ricarica con uno stato iniziale di carica pari al 46 % sono stati di 40 minuti. Il modello prevede che la ricarica avvenga in 39.8 minuti. Ciò conferma che il modello rispecchia egregiamente i tempi di ricarica reali. Con quindi un bassissimo sforzo computazionale si riesce ad ottenere una buona approssimazione che rispecchia correttamente la carica della batteria. Come conclusione si vuole fare una breve sintesi sul lavoro fatto. Il modello creato è adattabile facilmente a qualunque batteria al Litio, con l'inserimento del valore di tensione e di corrente minima e massima applicabile, del valore della resistenza interna, e del valore dello stato di carica iniziale. La scelta di questo tipo di circuito è stata possibile solo grazie alla presentazione dei vari modelli circuitali che descrivono il comportamento delle batterie al Litio, ma soprattutto è stata possibile grazie a tutte le prove sperimentali eseguite per la valutazione dei parametri del modello DP. Perché solo grazie alla sperimentazione si è riuscito a dimostrare come sia impossibile procedere con così tanti test ogni volta che un veicolo debba caricarsi. Quindi si riesce a capire la doverosa scelta di un circuito composto dalla sola resistenza interna e da un andamento della tensione interna in funzione dello stato di carica descritto tramite una funzione lineare. Grazie a questa trattazione si può passare, nel prossimo paragrafo, ad esplicitare come vengono gestite più cariche, vedendo quindi il problema nel suo complesso.

#### 6.4.3 Esempio applicativo di una gestione delle cariche

Per capire come vengono gestite più cariche si è scelto di effettuare un esempio; spiegando meglio cosa si voleva enunciare quando si parlava della minima carica da garantire ad ogni veicolo e delle soglie di partizione della corrente. Supponiamo che un industria voglia procedere con l'installazione di alcuni punti per la ricarica dei veicoli



elettrici. Supponiamo che l'azienda in questione voglia rendere disponibile per la ricarica 30kW, installando 5 punti di ricarica:

1. PUNTO DI CARICA 1, chiamato C1; esso sarà disposto di una colonnina monofase con potenza pari a 3.5kW.
2. PUNTO DI CARICA 2, chiamato C2; esso sarà disposto di una colonnina monofase con potenza pari a 3.5kW.
3. PUNTO DI CARICA 3, chiamato C3; esso sarà disposto di una colonnina trifase con potenza pari a 22kW.
4. PUNTO DI CARICA 4, chiamato C4; esso sarà disposto di una colonnina monofase con potenza pari a 3.5kW.
5. PUNTO DI CARICA 5, chiamato C5; esso sarà una semplice presa schuko con accesso limitato e potenza pari a 3kW.

Una schematizzazione più sintetica è visibile nella seguente figura, Fig. 6.23:






Pv=30kW In=50A				
C1(L1)	C2(L2)	C3(L1,L2,L3)	C4(L3)	C5(L1)
				
Nessun veicolo	Nessun veicolo	Nessun veicolo	Nessun veicolo	Nessun veicolo
Pmax=3,5kW	Pmax=3,5kW	Pmax=22kW	Pmax=3,5kW	Pmax=3kW

Fig. 6.23 – Schematico dei punti di ricarica dell'esempio considerato

Ragionando sulle potenze richieste dalle colonnine sarà necessario avere un sistema di gestione che regola, secondo certi parametri, i flussi di potenza forniti ai vari veicoli. In più si suppone presente un interruttore a monte dei 5 punti di ricarica con corrente nominale di 50 A. Un'ulteriore ipotesi risiede nel fattore di potenza: il cosφ dei 5 carichi lo si suppone uguale per tutti e pari a 0,96. In più supponiamo di connettere il carico monofase C1 e C5 alla fase L1; il carico C2 alla fase L2; il carico C4 alla fase L3. Il Green Up

Manager deve gestire i flussi di potenza senza eccedere la potenza massima, e senza superare la corrente nominale; è per questo motivo che si è dovuto esplicitare su che fase vengono connessi i carichi. Ora per capire come viene gestito il sistema si deve fare un passo indietro per definire la minima quantità di carica garantita e le soglie di corrente. Come minima quantità di carica garantita si intende la minima quantità di carica che ogni veicolo deve almeno ricevere. Le soglie di corrente definiscono i passi discretizzati con i quali può essere diminuita la corrente durante la gestione delle cariche. Entrambi i valori sono configurabili nel software di gestione e sarà l'amministratore che li deciderà. Supponiamo in questo esempio che l'amministratore decida di imporre una quantità minima di carica garantita ad ogni utilizzatore pari a 16 Ah, che ciascun passo di riduzione della corrente sia pari al 25% e che siano presenti solamente due soglie di riduzione. In altre parole la corrente potrà assumere solo i seguenti valori 100%, 75%, 50%. Per capire come opera il Green Up è di più semplice comprensione effettuare un esempio esplicativo.

Si suppone che i veicoli si connettano in vari step:

- Step 1, connessione di tre veicoli alle prese EV Plug delle stazioni C1, C2, C3. La configurazione quindi cambierà e verrà assorbita una potenza  $P_u$  pari a 29 kW. La corrente che fluirà sulle tre fasi a monte dove è presente l'interruttore generale è pari a 48A. Essendo la potenza necessaria inferiore ai 30 kW disponibili, e la corrente inferiore ai 50A, si potrà procedere con la ricarica dei veicoli alla corrente massima erogabile da ogni colonnina, Fig. 6.24.






Pv=30kW In=50A				
C1(L1)	C2(L2)	C3(L1,L2,L3)	C4(L3)	C5(L1)
				
Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Nessun veicolo	Nessun veicolo
Pmax=3,5kW	Pmax=3,5kW	Pmax=22kW	Pmax=3,5kW	Pmax=3kW
16A	16A	32A trifase	--	--
Pu=29kW Iu=48A				
Pu<Pv e Iu<In				
Soluzione accettata				

Fig. 6.24 – Connessione dei veicoli alle colonnine C1, C2, C3

- Step 2, connessione del quarto veicolo alla stazione di ricarica C4. La connessione di quel veicolo porterebbe ad assorbire una potenza  $P_u$  maggiore della  $P_v$ , Fig. 6.25, e ciò deve obbligare a far ridistribuire i flussi di potenza così da poter ritornare al di sotto del valore della potenza contrattuale. Per far ciò però vi sono più casi:
  - Step 2a, caso in cui un veicolo abbia già raggiunto la quantità minima di carica garantita. Supponiamo che il veicolo in questione sia C3. In questo caso significherebbe che il veicolo connesso a C3, debba aver ricevuto almeno 32 A per mezz'ora, così da raggiungere i 16 Ah, imposti dall'amministratore durante la configurazione dell'impianto. In questo caso la riduzione della potenza sarà a carico del solo veicolo connesso a C3. Come si nota nella Fig. 6.26, la variazione della corrente avverrà secondo le soglie definite precedentemente, in questo caso diminuirà del 25%. Così da ridurre al 75% la potenza che normalmente assorbe C3.






Pv=30kW In=50A				
C1(L1)	C2(L2)	C3(L1,L2,L3)	C4(L3)	C5(L1)
				
Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Nessun veicolo
Pmax=3,5kW	Pmax=3,5kW	Pmax=22kW	Pmax=3,5kW	Pmax=3kW
16A	16A	32A trifase	16A	--
Pu=32,5kW Iu=48A				
Pu>Pv e Iu<In				
Soluzione non accettata				

Fig. 6.25 – Connessione del quarto veicolo che porterebbe a superare la potenza contrattuale






Pv=30kW In=50A				
C1(L1)	C2(L2)	C3(L1,L2,L3)	C4(L3)	C5(L1)
				
Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Nessun veicolo
Pmax=3,5kW	Pmax=3,5kW	Pmax=22kW	Pmax=3,5kW	Pmax=3kW
16A	16A	24A (75%) trifase	16A	--
Pu=27,5kW Iu=40A				
Pu<Pv e Iu<In				
Soluzione accettata				

Fig. 6.26 – Variazione della potenza del 25%, del veicolo connesso alla stazione C2, in quanto già raggiunta la minima carica garantita da quel veicolo

- Step 2b, caso in cui non sia raggiunta la minima quantità di carica garantita da nessun veicolo. In questo caso per decidere come ridistribuire i flussi di potenza si devono valutare gli istanti di tempo in cui si sono connessi i

veicoli alle colonnine. Per questo esempio si suppone che il veicolo connesso a C1 sia stato il primo a connettersi, poi il veicolo C2, poi il C3 ed infine il veicolo C4. In questo caso il veicolo C4, siccome è il veicolo che cerca di connettersi, diminuisce del 25 % la corrente che normalmente C4 dovrebbe assorbire. Riducendo la potenza che assorbe C4 al 75%, la  $P_u$  sarà ancora maggiore di  $P_v$ , Fig. 6.27. Quindi sarà ridotto dell'ulteriore 25%, cioè la seconda soglia disponibile, quindi al 50% della potenza massima fornibile, ma anche in questo caso la  $P_u$  sarà maggiore della  $P_v$ , Fig. 6.28. Ora per poter riportare la potenza al di sotto del valore contrattuale, l'algoritmo deve intervenire sugli altri carichi. In questo caso però nessuno ha raggiunto la quantità minima garantita e quindi il Green Up manager agisce riducendo la corrente del primo veicolo connesso, in questo caso C1, del 25%, Fig. 6.29. La riduce al primo veicolo connesso perché si suppone che, siccome è connesso da più tempo, sia quello che abbia ricevuto la carica maggiore rispetto agli altri. La potenza  $P_u$  tornerà al di sotto della potenza  $P_v$  e ciò permetterà possibile la realizzazione di questa configurazione.






P <sub>v</sub> =30kW I <sub>n</sub> =50A				
C1(L1)	C2(L2)	C3(L1,L2,L3)	C4(L3)	C5(L1)
				
Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Nessun veicolo
P <sub>max</sub> =3,5kW	P <sub>max</sub> =3,5kW	P <sub>max</sub> =22kW	P <sub>max</sub> =3,5kW	P <sub>max</sub> =3kW
16A	16A	32A trifase	12A (75%)	--
P <sub>u</sub> =31,625kW I <sub>u</sub> =48A				
P <sub>u</sub> >P <sub>v</sub> e I <sub>u</sub> <I <sub>n</sub>				
Soluzione non accettata				

Fig. 6.27 – Riduzione al 75% del valore di potenza fornita al veicolo connesso a C4






Pv=30kW In=50A				
C1(L1)	C2(L2)	C3(L1,L2,L3)	C4(L3)	C5(L1)
				
Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Nessun veicolo
Pmax=3,5kW	Pmax=3,5kW	Pmax=22kW	Pmax=3,5kW	Pmax=3kW
16A	16A	32A trifase	8A (50%)	--
Pu=30,75kW Iu=48A				
Pu>Pv e Iu<In				
Soluzione non accettata				

Fig. 6.28 – Riduzione al 50% del valore di potenza al veicolo connesso a C4






Pv=30kW In=50A				
C1(L1)	C2(L2)	C3(L1,L2,L3)	C4(L3)	C5(L1)
				
Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Nessun veicolo
Pmax=3,5kW	Pmax=3,5kW	Pmax=22kW	Pmax=3,5kW	Pmax=3kW
12A (75%)	16A	32A trifase	8A	--
Pu=29,875kW Iu=48A				
Pu<Pv e Iu<In				
Soluzione accettata				

Fig. 6.29 – Riduzione al 75% del valore di potenza al veicolo C1, perché il primo ad essersi connesso

- Step 3, connessione del quinto veicolo alla stazione di ricarica C5. In questo caso la connessione è diversa dalle altre connessioni effettuate fino ad ora. Perché la presa, dove si connette, è una semplice schuko, e quindi non è una presa smart in grado di limitare l'assorbimento di potenza come per gli altri casi. Quindi un veicolo connesso ad una presa di questo tipo può assorbire o il 100% oppure lo 0%

della potenza fornibile dalla colonnina. Quindi la riduzione della potenza è a carico esclusivo delle altre prese. La gestione della potenza è molto simile a quella già indicata precedentemente, con la differenza che in questo caso la potenza assorbita da C5 non varia. Anche qui si sono due più casi: il caso in cui un carico abbia già raggiunto la quantità minima garantita ed il caso in cui nessuno abbia raggiunto la minima quantità di carica garantita. Osserviamo il caso in cui C3 abbia raggiunto la quantità di carica minima garantita, Fig. 6.30, e che la corrente sia ridotta al 75 % del suo valore massimo. In questo caso la  $P_u$  è minore di  $P_v$ , ma la corrente  $I_u$  è maggiore della corrente  $I_n$  e quindi questa configurazione non è accettata. Quindi per risolvere questo problema il sistema di gestione diminuisce ulteriormente la corrente assorbita da C3, al 50% del suo valore massimo, Fig. 6.31. Con questa nuova configurazione si è rispettato sia il vincolo imposto dalla potenza, sia quello imposto dalla corrente.






P <sub>v</sub> =30kW I <sub>n</sub> =50A				
C1(L1)	C2(L2)	C3(L1,L2,L3)	C4(L3)	C5(L1)
				
Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso
P <sub>max</sub> =3,5kW	P <sub>max</sub> =3,5kW	P <sub>max</sub> =22kW	P <sub>max</sub> =3,5kW	P <sub>max</sub> =3kW
12A	16A	24A (75%) trifase	8A	14A
P <sub>u</sub> =27,375kW I <sub>u</sub> =54A				
P <sub>u</sub> <P <sub>v</sub> e I <sub>u</sub> >I <sub>n</sub>				
Soluzione non accettata				

Fig. 6.30 – Connessione del carico C5, ad una presa non Smart, e variazione della potenza assorbita da C3, in quanto è l'unico veicolo ad aver raggiunto la quantità minima garantita






Pv=30kW In=50A				
C1(L1)	C2(L2)	C3(L1,L2,L3)	C4(L3)	C5(L1)
				
Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso
Pmax=3,5kW	Pmax=3,5kW	Pmax=22kW	Pmax=3,5kW	Pmax=3kW
12A	16A	16A (50%) trifase	8A	14A
Pu=22,5kW Iu=46A				
Pu<Pv e Iu<In				
Soluzione accettata				

Fig. 6.31 – Ulteriore riduzione della corrente assorbita da C3, così da rispettare il vincolo imposto dalla corrente nominale dell'interruttore a monte

Come si può notare la configurazione di partenza, per la Fig. 6.30, è quella indicata nella Fig. 6.29, cioè quella configurazione che si aveva un attimo prima che il veicolo C5 si connetteva. Come si nota però la potenza  $P_u$  è nettamente inferiore alla potenza  $P_v$ , e quindi in questo caso il sistema di gestione riadatta gli assorbimenti degli altri carichi per poter utilizzare al meglio la potenza disponibile. Per far ciò il sistema di gestione aumenta la potenza di C4, perché quello connesso alla ricarica da meno tempo, ricalcolando che  $P_u$  sia ancora minore di  $P_v$ , poi fa la stessa operazione con C1. La configurazione finale che si ottiene è visibile nella seguente figura, Fig. 6.32.








Pv=30kW In=50A				
C1(L1)	C2(L2)	C3(L1,L2,L3)	C4(L3)	C5(L1)
				
Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso	Veicolo connesso
Pmax=3,5kW	Pmax=3,5kW	Pmax=22kW	Pmax=3,5kW	Pmax=3kW
16A (100%)	16A	16A trifase	16A (100%)	14A
Pu=24,5kW Iu=46 A				
Pu<Pv e Iu<In				
Soluzione accettata				

Fig. 6.32 – Riadattamento dei flussi di potenza per utilizzare al meglio la potenza disponibile, sempre nel caso in cui il carico C3 abbia raggiunto la quantità minima di carica garantita

Ora ci sarebbe da valutare come il sistema riadatterebbe i carichi se nessuno avesse raggiunto la quantità minima di carica garantita. La logica è uguale a quella indicata nello step 2b, con la differenza che per il carico C5 non ci sarebbe una riduzione della potenza perché il veicolo è connesso ad una presa non intelligente. Siccome la logica è identica, si è deciso di omettere questa configurazione, per non rendere troppo pesante la trattazione. Nel capitolo successivo si vuole fare una breve conclusione sul lavoro effettuato.



## 7. Conclusioni e sviluppi futuri

Si vuole ricapitolare l'intero processo di ricarica di un veicolo, sia dal punto di vista del gestore delle ricariche, che dall'utente che vuole ricaricare il proprio veicolo. La situazione attuale, come già preannunciato precedentemente, non consente di scambiare informazioni tra il veicolo e la colonnina. O meglio la tecnologia in grado di far ciò è più che affermata, ma non ci sono standard che definiscono come deve avvenire lo scambio di informazioni tra veicolo e colonnina. Più precisamente uno standard di comunicazione è presente nell'Annex A della norma IEC 61851, dove si definisce il protocollo di comunicazione tra veicolo e colonnina, per la gestione della carica. O meglio, tramite il control pilot ed il proximity, come scambiare le informazioni per decidere quando far partire la carica del veicolo, come ridurre la corrente di carica, quando ritenere completa la carica, e tutti i livelli di sicurezza che garantiscono una corretta carica. Mentre norme che definiscono quali parametri vanno scambiati per gestire la carica non sono state ancora sviluppate. Per questo motivo tutte le informazioni che fino ad ora vengono richieste per la corretta gestione della carica devono essere inserite manualmente dall'utente. Quindi un utilizzatore che vuole procedere con la ricarica del proprio veicolo è tenuto a digitare sul display della colonnina tutte le grandezze indicate nel paragrafo precedente. Tutte le grandezze che vanno inserite sono indicate sui datasheet dei veicoli, ciò che non vi è presente è lo stato iniziale di carica. Questa variabile come già detto è fondamentale per gestire la correttamente la carica, e non sempre il sistema di gestione della batteria mette a disposizione questa informazione, per questo motivo grazie alle prove sperimentali si è potuto dimostrare che è possibile trovare lo stato di carica della batteria leggendo direttamente la tensione ai morsetti della batteria, quando essa non è connessa al carico. Una volta inserite le informazione tramite il display della colonnina, il Green Up Manager gestisce la carica nel miglior modo possibile, dando un feedback continuo all'utente sullo stato della carica. Cioè tramite il modello creato, l'utente, ed il gestore del parco ricariche, saranno in grado di controllare istante per istante il livello di carica raggiunto ed il tempo stimato per il termine della ricarica, su dispositivi come smartphone o PC. In più si può pensare di poter dare all'utente anche una stima dei

chilometri percorribili con la carica effettuata fino a quell'istante. Questa operazione è molto semplice, in quanto basterebbe una stima del consumo, espressa in kWh/km, che il veicolo fornisce all'utente tramite il computer di bordo, aggiungere questa variabile alla lista di variabili immesse a display, e grazie all'energia che la colonnina fornisce al veicolo, fornire una stima dei chilometri percorribili. Questo è il panorama attuale che rimarrà fino a che non si stabiliranno degli standard di comunicazione che permetteranno il passaggio di queste variabili direttamente dal veicolo alla colonnina. Per far ciò è assolutamente doveroso lavorare su un sistema di questo tipo, perché solo grazie all'introduzione sul mercato di un certo numero di veicoli, si è in grado di permettere lo sviluppo di uno standard comune ed internazionale, che permetterà a suo seguito di raggiungere una massa critica di persone che potranno adottare questa nuova concezione di trasporti, e quindi creare il fenomeno del bandwagon effect facendo utilizzare i veicoli elettrici in tutte le parti del mondo.

---

## BIBLIOGRAFIA

- [1] David Linden, Thomas B. Reddy - *"Handbook of Batteries - third edition"* - McGraw Hill
- [2] Sandeep Dhameja - *"Electric vehicle battery systems"* – Newnes
- [3] M. Wakihara, O. Yamamoto (Eds.) – *"Lithium Ion Batteries – Fundamentals and Performance"* – KODANSHA, WILEY-VCH
- [4] F. Alessandrini, G. B. Appetecchi, M. Conte – *"Studio di fattibilità tecnica sull'applicabilità delle batterie al litio nelle reti elettriche – Stato dell'arte e limiti scientifici e tecnologici"* – ENEA
- [5] Mehul Oswal, Jason Paul, Runhua Zhao – *"A comparative study of Lithium Ion batteries"* – University of Southern California
- [6] Bhaskar Saha, Kai Goebel – *"Modeling Li-ion Battery Capacity Depletion in a Particle Filtering Framework"* - Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2009
- [7] E. Micolano, R. Lazzari – *"Validazione della procedura di prova per batterie Litio-ioni: risultati delle prove di caratterizzazione"* – RSE
- [8] S. Celaschi, G. Mauri, R. Lazzari, E. Micolano – *"Tecnologie abilitanti la diffusione dei veicoli elettrici stradali Plug-In: sistemi di accumulo, ricarica e telecomunicazioni"* – ERSE
- [9] G. Pede, V. Sglavo, F. Vellucci, C. Villante – *"Report su test di ricarica rapida di batterie al litio"* – ENEA
- [10] T.R. Crompton – *"Battery Reference Book"* – Third Edition - Newnes
- [11] S. Benjamin, P. Desprez, JM Bourdet, JL Bouysset, O. Pape, F. Jegat, F. Duclaud, S. M. Qaisar, D. Dallet, S. Rael, B. Davat – *"LIFEMIT – Project ANR-07-PDIT-004"* – IEEE
- [12] H. Beltran, M. Swierczynski, N. Aparicio, E. Belenguer, R. Teodorescu, P. Rodriguez – *"Lithium Ion Batteries Ageing Analysis when used in a PV Power Plant"* – IEEE
- [13] Kelsey B. Hatzell, Aabhas Sharma, Hosam K. Fathy – *"A Survey of Long-Term Health Modeling, Estimation and Control of Lithium Ion Batteries: Challenges and Opportunities"* – 2012 American Control Conference IEEE

- [14] Habib AL JED, André MIEZE, Jean-Michel VINASSA, Rémi Simon – *“Mathematical Modeling of aging factors for Li-Ion battery cells”* – IEEE
- [15] R.M. Dell, D.A.J. Rand – *“Understanding Batteries”* – RSC PAPERBACKS
- [16] Ding Zuowu, Wang Shulin, Zhao Weijun, Qu Min – *“Study about Lithium Battery’s characteristics”* – 2010 International Conference on Computers, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE) IEEE
- [17] Louis W. Hruska – *“Smart Batteries and Lithium Ion Voltage Profiles”* – IEEE
- [18] CDIAC-Carbon Dioxide Information Analysis Center - <http://cdiac.ornl.gov/>
- [19] [www.batteryuniversity.com](http://www.batteryuniversity.com)
- [20] [www.powersimtech.com](http://www.powersimtech.com)
- [21] [www.uscar.org](http://www.uscar.org)
- [22] [www.mpoweruk.com/performance](http://www.mpoweruk.com/performance)
- [23] Data Sheet – Boston Power – Swing 5300 Rechargeable Lithium-ion cell
- [24] H.B. Gooi, S. X. Chen – *“An Improved Lithium-ion Battery Model with Temperature Prediction Considering Entropy”* – IEEE
- [25] Data Sheet – Hi Power – Lithium Iron Phosphate Battery Type: HP-LX-300AH
- [26] Francesco Vellucci, Giovanni Pedè – *“Sviluppo di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non auto motive”* – ENEA
- [27] [www.treccani.it](http://www.treccani.it)
- [28] Hongwen He, Rui Xiong and Jinxin Fan – *“Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models For State Of Charge Estimation By An Experimental Approach”* – Energies ISSN 1996 – 1073
- [29] Long Cai, Ralph E. White – *“Mathematical Modeling of a Lithium Ion Battery”* – Department of Chemical Engineering, University of South Carolina
- [30] P. Ramadass, Bala Haran, Ralph White, Branko N. Popov – *“Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells”* – Department of Chemical Engineering, University of South Carolina, Columbia, SC 29208, USA
- [31] A. Aron, G. Girban, C. Pop – *“About the solution of a battery mathematical model”* – University of Timisoara
- [32] P. Spagnol, S. Rossi, S. M. Savaresi – *“Kalman Filter SoC estimation for Li-Ion batteries”* – 2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)

- 
- [33] [www.scame.com/it/infopoint/newmobility/focus\\_normativo\\_internazionale.asp](http://www.scame.com/it/infopoint/newmobility/focus_normativo_internazionale.asp)
- [34] [www.charge.yazaki-group.com/english/product/normal\\_outlet.html](http://www.charge.yazaki-group.com/english/product/normal_outlet.html)
- [35] *“Infrastructure components for electric mobility”* – Mennekes
- [36] [www.scame.com/it/prodotto/ser/libera\\_connettori.asp](http://www.scame.com/it/prodotto/ser/libera_connettori.asp)
- [37] [www.mennekes.de/uploads/media/MENNEKES\\_Media\\_information\\_\\_Charging\\_couplers\\_Type\\_2\\_for\\_AC\\_and\\_DC\\_charging\\_01](http://www.mennekes.de/uploads/media/MENNEKES_Media_information__Charging_couplers_Type_2_for_AC_and_DC_charging_01)
- [38] [www.zeroemission.eu/portal/news/topic/Mobilit%C3%A0sostenibile/id/8468/Nasce-CHAdeMO-colossi-giapponesi-per-lauto-elettrica](http://www.zeroemission.eu/portal/news/topic/Mobilit%C3%A0sostenibile/id/8468/Nasce-CHAdeMO-colossi-giapponesi-per-lauto-elettrica)
- [39] [www.insideevs.com/dc-quick-charging-battle-just-beginning-chademo-vs-sae-combo-vs-tesla-supercharger/](http://www.insideevs.com/dc-quick-charging-battle-just-beginning-chademo-vs-sae-combo-vs-tesla-supercharger/)
- [40] *“Instruction Manual for DC Vehicle Connector”* – Yazaki Corporation
- [41] Catalogue Legrand – *“Produits et systèmes pour infrastructures électriques et numériques du bâtiment”* – 2013-2014
- [42] [www.SMcars.net](http://www.SMcars.net)
- [43] Giuseppe Mauri – *“Auto elettrica e reti intelligenti”* – AEIT