

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA Corso di Laurea Triennale in INGEGNERIA INFORMATICA E DELL'AUTOMAZIONE

TESI DI LAUREA

Progettazione e studio del sistema di accumulo energetico per una vettura elettrica FSAE

Design and study of the energy storage accumulator for an FSAE electric car

Candidato: Ferretti Jacopo Matricola 1083518 Relatore: CONTI MASSIMO

Correlatore: ORCIONI SIMONE

Indice

In	trodu	zione		4
1	Stat	to dell'	arte dei veicoli elettrici	7
	1.1	Introd	luzione	$\overline{7}$
		1.1.1	BEV - Battery Electric Vehicle	8
		1.1.2	HEV - Hybrid Electric Vehicle	10
		1.1.3	FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle	11
	1.2	Parti	fondamentali di un BEV	13
		1.2.1	Motore Elettrico	14
		1.2.2	Inverter	17
		1.2.3	Pacco batteria	19
2	Bat	terie el	ettrochimiche	27
	2.1	Confr	onto tra le diverse chimiche	28
	2.2	Cella	agli ioni di litio	31
		2.2.1	Reazione chimica	31
		2.2.2	Package	33
	2.3	Mode	llo circuitale equivalente - ECM	35
		2.3.1	Dinamica in scarica	36
		2.3.2	Dinamica in carica	38
		2.3.3	Estrazione dei parametri	39
	2.4	State	Of Charge – SOC	43
		2.4.1	SOC – OCV	43
		2.4.2	Coulomb Counting	44
		2.4.3	Enanched Coulomb Counting	45
		2.4.4	SOC – Filtro di Kalman	47
		2.4.5	SOC – Unscented Kalman Filter	52
		2.4.6	Estrazione dei parametri con recursive least square algorithm	
			(RLS)	55
		2.4.7	RLS per stimare i parametri di una cella Li-ion	58
	2.5	RLS i	mplementazione in Simulink	62

3.0.1 Pacco 3.1.1 3.1.2 3.1.3 Accum 3.2.1 3.2.2 3.2.3 Banco 3.3.1 3.3.2 3.3.3	Restriz batteria Requis Scelta Sony V ulator ADC - isoSPI Master prove 2 Test 20 Scarica	zioni a – di siti della /TC5 Mana - LTC inter r Line 2018-2 018-2 a	regol imens a cella 5 ageme C6813 rface duino 2019 2019	lame siona ent S 3-1 LTC 	nto umen Syste 	 nto em 0 	 de 	ill'a AM		 um 	nul		ore		· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · ·		· · · · ·	· · · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	· · · · · · · · · ·	84 85 86 89 93 94 95 98 99
Pacco 3.1.1 3.1.2 3.1.3 Accum 3.2.1 3.2.2 3.2.3 Banco 3.3.1 3.3.2 3.3.3	batteria Requis Scelta Sony V ulator ADC - isoSPI Master prove 2 Test 20 Scarica	a – di siti . della /TC5 Mana - LTC inter c Line 2018-2 a	imens a cella 5 ageme C6813 rface duino 2019 2019 2019	siona a . ent § 3-1 LTC 	amen Syste 	nto em 0 	de 	ll'a AM	icc i i IS i i	um 	nul	lat(ore		· · · · · · · · ·	· · · ·			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	85 86 89 93 94 95 98 99
5.1.1 5.1.2 5.1.3 Accum 5.2.1 5.2.2 5.2.3 3.2.3 3.3.1 5.3.2 5.3.3	Requis Scelta Sony V ulator 1 ADC isoSPI Master prove 2 Test 20 Scarica	siti . della /TC5 Mana - LTC inter c Line 2018-2 a	a cella 5 26813 rface duino 2019 2019	 a . ent § 3-1 LTC) .	 Syste 2682 	· · · em · · 0 · ·	· · · · · · · · ·	:	: 1S : :	· · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			· · · · · · · · ·	· · · ·			· · · · · · · · ·	· · · · · · · ·		86 89 93 94 95 98 99
5.1.2 5.1.3 Accum 5.2.1 5.2.2 5.2.3 Banco 5.3.1 5.3.2 5.3.3	Scelta Sony V ulator 1 ADC - isoSPI Master prove 2 Test 20 Scarica	della VTC5 Mana - LTC inter c Line 2018-2 a	a cella 5 ageme C6813 rface duino 2019 2019	a . ent \$ 3-1 LTC > . 	 Syste 682 	· · · em · · · 0 · · ·	· · · - / · · ·	AM	1S	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•		· · ·	· · ·			· · · · · ·	· · · · · ·		89 93 94 95 98 99
3.1.3 Accum 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.3.2 3.3.1 3.3.2 3.3.3	Sony V ulator 1 ADC - isoSPI Master prove 2 Test 20 Scarica	/TC5 Mana - LTC inter r Line 2018-2 018-2 a	5 ageme C6813 rface duino 2019 2019	 ent \$ 3-1 LTC) 	 Syste 682 	 em 0 	· · · - / · · · · ·	AM		· · · · ·		· · ·	•		· · ·						• • •	93 94 95 98 99
Accum 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.3.1 3.3.1 3.3.2 3.3.3	ADC - isoSPI Master prove 2 Test 20 Scarica	Mana – LTC inter r Lind 2018–2 018–2 a	agem C6813 rface duino 2019 2019	ent \$ 3-1 LTC > . 	Syste 682 	em • • 0 • •	- 1 	4N	1S	 		 	•		 					• • •		94 95 98 99
3.2.1 3.2.2 3.2.3 3anco 3.3.1 3.3.2 3.3.3	ADC isoSPI Master prove 2 Test 20 Scarica	- LT(inter r Line 2018-2 018-2 a	C681; rface duino 2019 2019	3-1 LTC > . 	 682 	 0 	· ·		•	· · · ·		 	•		· ·							95 98 99
5.2.2 5.2.3 3anco 5.3.1 5.3.2 5.3.3	isoSPI Master prove 2 Test 20 Scarica	inter r Line 2018-1 018-2 a	rface duino 2019 2019	LTC) . 	682 	0 · · · · ·	 		•	 		 	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••		 			•		•		98 99
8.2.3 Banco 8.3.1 8.3.2 8.3.3	Master prove 2 Test 20 Scarica	r Line 2018-: 018-2 a	duinc 2019 2019) . 	· ·	 	 	•	•	 		· ·	•		 	•	•	•	•	•	•	99 100
Banco 8.3.1 8.3.2 8.3.3	prove 2 Test 20 Scarica	2018-1 018-2 a	2019 2019	 	• •				•			• •	•	•			•					100
8.3.1 8.3.2 8.3.3	Test 20 Scarica	018-2 a	2019																-	-		100
8.3.2 8.3.3	Scarica	a			• •						•											103
3.3.3	Corico																					103
	Carica												•									106
3.3.4	Aggior	name	enti h	nardv	ware	e 20	20						•									109
AMS s	oftware)											•									109
AMS 1	Polimar	che F	Racing	g Te	am	V1							•									113
8.5.1	Master	r con	trolle	er.									•						•	•		113
3.5.2	ADC s	slaves	5										•						•	•		114
8.5.3	SPI-iso	oSPI	conve	erter	•								•									119
8.5.4	Sensor	e di o	correr	nte									•						•	•		120
8.5.5	Accum	nulato	or Iso	olatic	on R	ela	ys ·	- A	١F	₹.			•									121
Power	rain .												•									123
8.6.1	AMK	FSE	RAC	ING	KI'	Г							•									124
	.3.4 MS s MS H .5.1 .5.2 .5.3 .5.4 .5.5 Powert .6.1	.3.4 Aggion MS software MS Polimar .5.1 Master .5.2 ADC s .5.3 SPI-iso .5.4 Sensor .5.5 Accum Powertrain . .6.1 AMK	.3.4AggiornamAMS software.AMS Polimarche I.5.1Master con.5.2ADC slaves.5.3SPI-isoSPI.5.4Sensore di.5.5AccumulatePowertrain6.1AMK FSE	.3.4 Aggiornamenti h AMS software	.3.4 Aggiornamenti hardy AMS software	.3.4 Aggiornamenti hardware AMS software	.3.4 Aggiornamenti hardware 20 AMS software	.3.4 Aggiornamenti hardware 2020 AMS software	.3.4 Aggiornamenti hardware 2020 AMS software	.3.4 Aggiornamenti hardware 2020 AMS software AMS Polimarche Racing Team V1 .5.1 Master controller .5.2 ADC slaves .5.3 SPI-isoSPI converter .5.4 Sensore di corrente .5.5 Accumulator Isolation Relays - AIF Powertrain .6.1 AMK FSE RACING KIT	.3.4 Aggiornamenti hardware 2020 AMS software	.3.4 Aggiornamenti hardware 2020 AMS software	.3.4 Aggiornamenti hardware 2020 AMS software	.3.4 Aggiornamenti hardware 2020 AMS software								

Bibliografia	
--------------	--

137

Introduzione

Durante gli ultimi anni le vetture a trazione elettrica stanno avendo un grande successo nell'industria automobilistica: nel 2020 non è raro che sfogliando un listino di una qualsiasi casa automobilistica si trovino delle soluzioni di veicoli elettrici a batteria (EV o BEV), o veicoli ibridi elettrici plug-in (PHEV). Nel report annuale di IEA [1] le vendite di veicoli elettrici (EV e PHEV nel settore light-duty, quindi macchine per passeggeri o furgoni) nel 2019 hanno raggiunto i 2.1 milioni nel mondo (2.6% delle vendite globali), superando il trend positivo dell'anno precedente del 6%. A trainare le vendite nel mercato mondiale c'è la Cina, che vede però un leggero decremento delle vendite a causa del graduale decremento degli incentivi, mentre l'unione europea che si presenta come il secondo mercato mondiale per i veicoli elettrici continua a crescere e a confermare il trend positivo delle vendite. Un altro importante mercato dove i veicoli elettrici hanno riscontrato successo è quello della mobilità urbana, osservabile sia per quanto riguarda il trasporto pub-

quello della mobilità urbana, osservabile sia per quanto riguarda il trasporto pubblico tramite autobus, sia con lo sharing cittadino di mezzi elettrificati come monopattini, biciclette, motorini ed automobili.

Questo enorme successo, trascinato dalla brillante casa automobilistica Tesla, è dovuto da diversi fattori: l'ormai sempre crescente coscienza ambientale che possiedono gli acquirenti di un autoveicolo vede nei veicoli elettrici un modo per ridurre l'inquinamento atmosferico (rispetto ad un tradizionale motore a combustibile), infatti le campagne marketing EV si focalizzano molto su questo aspetto, promettendo di migliorare la vita cittadina nelle città più popolose dove le emissioni dei veicoli rendono l'aria insalubre.

Sempre per lo stesso motivo, gli automobilisti sono invogliati ad acquistare un veicolo elettrico per poter entrare all'interno delle zone a traffico limitato, dove solitamente vengono lasciati transitare i veicoli con le emissioni più basse.

Un dossier di RSE [2] mostra come la diminuzione del traffico in Lombardia durante i mesi di lockdown del 2020 ha portato ad una diminuzione delle concentrazione di NO_2 del 30%, concludendo che il miglioramento significativo della qualità dell'aria si ottiene a fronte di riduzioni molto significative delle emissioni stradali, che può essere ottenuto con un maggior utilizzo dei mezzi pubblici, o con il passaggio ai veicoli elettrici. Una contro-tesi che viene posta ai sostenitori della mobilità elettrica è che il problema dell'inquinamento non viene risolto, ma solamente decentralizzato: infatti bisogna tenere conto che ad oggi la produzione dell'enegia elettrica proviene ancora in grande percentuale da combustibili fossili inquinanti come carbone e lignite, oltre che dalle varie inefficienze dovute alla distribuzione e dallo stoccaggio dell'elettricità. Una risposta viene data da un altro dossier di RSE [3], per il quale i veicoli elettrici risultano emettere meno CO₂eq dei corrispondenti veicoli a combustione interna, anche nel caso estremo polacco, dove l'energia elettrica è ottenuta per il 70% da combustibili fossili. Nel dossier viene posto anche il problema delle emissioni dovute alla produzione delle batterie: infatti si evidenzia che la maggior parte degli studi svolti suppongono che la produzione avvenga in fabbriche cinesi, mentre sia Tesla sia la maggior parte delle case Europee producono batterie nei propri stabilimenti, o attraverso società controllate, e questo abbasserebbe di molto la stima delle emissioni di CO₂eq legate alla loro produzione.

Per quanto riguarda il problema della sostituzione delle batterie, sempre nello stesso dossier si sono visti studi per i quali la vita effettiva dell'accumulatore rispetti e talvolta superi le aspettative date dal produttore, questo ovviamente a vantaggio sia dell'investimento che ha fatto l'acquirente, sia della riduzione dell'impronta ecologica totale dell'automobile. Infine, si sarebbe anche dimostrato che da un punto di vista statistico la maggior parte degli spostamenti giornalieri sarebbe fattibile anche quando l'autonomia sia ridotta al 70%-80% rispetto alla capacità iniziale, rendendo l'ipotesi della sostituzione della batteria del tutto remota.

L'interesse verso l'ambiente è quello che sta trainando le diverse aziende, nonché le università di tutto il mondo, allo studio e alla produzione dei veicoli elettrici. L'UNIVPM è sempre stata in prima linea nella lotta all'inquinamento ambientale, e questa sfida è stata energicamente accettata dal Polimarche Racing Team, assieme alla gran parte delle squadre FSAE nel mondo, dando il via al progetto EV per il quale studenti e professori sono messi alla prova oltre che con tutta la parte dinamica del veicolo, anche con accumulatori e power train totalmente elettrici, per i quali l'interesse nella ricerca e nello sviluppo è particolarmente elevato.

Questa tesi ha lo scopo di descrivere i principali passaggi e le scelte di design svolte nella progettazione del sistema di accumulo energetico per la vettura Formula SAE svolto in collaborazione con il Polimarche Racing Team. Verrà posta particolare attenzione alle scelte di design, che dovranno essere giustificate sia da un punto di vista funzionale, ma anche da quello della minimizzazione dei costi che la squadra dovrà affrontare.

Durante tutta la trattazione le scelte effettuate faranno sempre capo al regolamento FS Rules 2020 Germany [4], che è il regolamento FSAE più utilizzato per la competizione tedesca, ma anche nella gran parte delle manifestazioni in Europa (come formula east).

Nel primo capitolo viene fatta una descrizione dello stato dell'arte dei veicoli elettrici e dei loro componenti, concentrandosi sui veicoli elettrici a batteria, che sono il focus di studio di questa tesi.

Nel secondo capitolo viene affrontato lo studio delle celle elettrochimiche utilizzate per tali veicoli, in particolare le celle agli ioni di Litio. Sempre nello stesso capitolo è stato progettato un algoritmo di stima dei parametri di una cella, che affiancato ad un filtro di kalman permette di misurare in modo efficace lo stato della carica.

Nel terzo capitolo viene mostrato il lavoro compiuto nel progetto della macchina elettrica Peacock EV del Polimarche racing team, descrivendone sia le caratteristiche hardware, che software, in particolar modo riguardante il Battery Management System. Questo capitolo è stato redatto interamente dal candidato (me, Jacopo Ferretti), anche se alcuni lavori sono stati fatti da altri membri del team (che sono stati opportunamente citati).

E stato meticolosamente descritto il processo di dimensionamento del pacco batterie, assieme la scelta dei sensori. È affrontata anche l'ingegnerizzazione e lo sviluppo software delle schede che controllano le celle. Vengono infine mostrati alcuni test compiuti su un banco prove, utili nella fase di debugging sia hardware che software.

Capitolo 1

Stato dell'arte dei veicoli elettrici

1.1 Introduzione

Il mercato dei veicoli elettrici si dirama in diverse categorie, delle quali tre principali: nella prima categoria possiamo inserire i veicoli elettrici a batteria, o BEV. Questi tipi di veicoli utilizzano una propulsione totalmente elettrica durante la marcia, e l'energia utilizzata dal motore viene accumulata in un pacco batteria che viene ricaricato da una rete elettrica esterna.

Nella seconda categoria possiamo inserire i veicoli ibridi, o HEV. Questi veicoli, oltre a sfruttare una propulsione elettrica, possiedono un motore termico che può essere utilizzato unicamente come generatore di energia elettrica per caricare le batterie (configurazione in serie), o come propulsore parallelamente al motore elettrico (configurazione in parallelo). Gli HEV forniscono da un lato la soluzione al problemi dovuti alla ricarica degli EV, mentre dall'altro con il recupero dell'energia in frenata migliorano molto l'efficienza di un motore a combustione.

Nell'ultima categoria fanno parte veicoli fuel cell (FCV), questi utilizzano l'idrogeno come combustibile per produrre energia. Il veicolo viene rifornito da un distributore di idrogeno, una volta che le celle sono cariche, queste effettuano una reazione elettrochimica che trasforma l'idrogeno in energia ed acqua. Il grande vantaggio, oltre quello di avere solo acqua come scarto per la produzione dell'energia, sta nello capacità specifica delle celle: molto maggiore rispetto alle attuali celle agli ioni di litio. Un secondo vantaggio risiede nell'effettiva velocità di ricarica, che potrebbe essere paragonata a quella di un pieno di benzina (rispetto alle ore che i clienti BEV devono aspettare per caricare il proprio pacco batteria. Ad oggi lo studio nel campo delle celle a combustibile è ancora acerbo, in molti criticano l'inefficienza della produzione e della distribuzione dell'idrogeno, nonché il prezzo di queste soluzioni rendono questi tipi di veicoli ancora dei prototipi.

In Fig. 1.1 vengono confrontate le caratteristiche principali dei veicoli BEV, HEV, e FCV.

Types of EVs	Battery EVs	Hybrid EVs	Fuel Cell EVs
Propulsion	Electric motor drives	Electric motor drivesInternal combustion engines	Electric motor drives
Energy system	BatteryUltracapacitor	BatteryUltracapacitorICE generating unit	 Fuel cells Need battery / ultracapacitor to enhance power density for starting.
Energy source & infrastructure	• Electric grid charging facilities	 Gasoline stations Electric grid charging facilities (for Plug In Hybrid) 	 Hydrogen Hydrogen production and transportation infrastructure
Characteristics	 Zero emission High energy efficiency Independence on crude oils Relatively short range High initial cost Commercially available 	 Very low emission Higher fuel economy as compared with ICE vehicles Long driving range Dependence on crude oil (for non Plug In Hybrid) Higher cost as compared with ICE vehicles The increase in fuel economy and reduce in emission depending on the power level of motor and battery as well as driving cycle. Commercially available 	 Zero emission or ultra low emission High energy efficiency Independence on crude oil (if not using gasoline to produce hydrogen) Satisfied driving range High cost Under development
Major issues	Battery and battery managementCharging facilitiesCost	 Multiple energy sources control, optimization and management. Battery sizing and management 	Fuel cell cost, cycle life and reliabilityHydrogen infrastructure

Figura 1.1: Characteristiche di BEVs, HEVs, e FCVs [5]

1.1.1 BEV - Battery Electric Vehicle

Nel mercato questi veicoli sono comunemente chiamati EV (Electric Vehicle), ma questo termine si riferisce alla definizione generale della classe di veicoli che possiedono una propulsione elettrica, quindi per essere precisi faremo riferimento a



Figura 1.2: Pacco batteria della Chevrolet boltEV [6]

questa classe di veicoli come BEV. Il veicolo elettrico ha molti vantaggi rispetto al veicolo con motore a combustione interna (ICEV), come ad esempio l'assenza di di petrolio, l'alta efficienza, e la silenziosità durante la marcia.

Come già detto i BEV accumulano l'energia all'interno di molte celle ioni di litio che compongono il pacco batterie (Fig. 1.2), queste sono gestite da un BMS (Battery Monitor System) che è considerato il componente chiave di un BEV: questo gestisce le informazioni, i problemi e la coordinazione delle celle durante tutta la vita dell'accumulatore. La trazione elettrica è gestita da un controllo elettronico che manda i segnali all'unità inverter: componente importante che gestisce l'erogazione della potenza dall'accumulatore ai motori, ma anche la rigenerazione dell'energia in frenata. Il power train elettrico è apprezzato per la sua versatilità e per le prestazioni superiori ai motori termici: l'erogazione della coppia è istantanea a qualsiasi numero di giri-motore, la possibilità di riacquistare energia in frenata ne aumenta molto l'efficienza del veicolo, ed il design compatto lo rende versatile durante la fase di ingegnerizzazione degli spazi (non è difficile trovare una configurazione con 4 piccoli motori, uno per ruota).

In molti pensano che il veicolo elettrico sia un'invenzione relativamente nuova, ma il primo veicolo elettrico fu inventato da Frenchman Gustave Trouvé già nel 1881: questo entrava in diretta concorrenza con i già esistenti veicoli a carbone e a petrolio che durante la fine del 1800 stavano rimpiazzando i calessi a trazione animale. Seguirono 20 anni di competizione tra i tre tipi di motorizzazione; la continua pavimentazione delle strade, soprattutto in Europa, iniziò a far creare interesse nei viaggi di tratte più lunghe, andando a favorire la motorizzazione a gasolio che non aveva stretti gli stretti limiti di percorrenza, e che grazie ai continui studi ed innovazioni stavano diventando sempre più economici ed affidabili. Dagli inizi del 1900, per 60 anni, i veicoli elettrici ebbero un ruolo secondario nel mercato, rientrando in settori minori come i golf kart o piccoli veicoli urbani. Un BEV degno di menzione a quei tempi fu il rover lunare utilizzato dagli astronauti statunitensi per gli spostamenti sulla Luna.

Durante gli anni 90, contemporaneamente all'introduzione sul mercato mondiale delle prime batterie agli ioni di litio, l'interesse attorno ai BEV tornò a crescere; la prima azienda a puntare su questo mercato fu Tesla nel 2008 con il lancio di Tesla Roadster, che con la sua autonomia di 393 km e le alte prestazioni, riuscì ad accaparrarsi la prima moderna vittoria commerciale da parte di un BEV: mossa che è risultata proficua, dato che ad oggi Tesla possiede più del 50% del market share mondiale dei BEV.

La differenza più grande rispetto ad un veicolo a combustione risiede nell'accumulatore: infatti se fino ad ora la ricarica di un veicolo classico avveniva in poco tempo dal benzinaio, nei BEV si introduce il problema della lentezza della ricarica. L'utente quindi avrà diverse possibilità di ricarica, che solitamente convergono nella classica ricarica da casa, o nelle colonnine veloci. L'iconografia in Fig. 1.3 mostra i principali metodi di ricarica.



Figura 1.3: Confronto tra diversi modi di caricare un BEV [7]

1.1.2 HEV - Hybrid Electric Vehicle

I veicoli ibridi stanno riscuotendo un grande successo negli ultimi anni perchè risolvono le principali criticità dei BEV: durata della batteria e lentezza della ricarica in primis, ma diventano una ancor più valida alternativa se consideriamo il prezzo molto inferiore, dovuto ad un pacco batterie più piccolo ed un power train meno ricercato rispetto ai veicoli totalmente elettrici.

Per veicolo ibrido si intende un qualsiasi veicolo con 2 o più accumulatori di energia e propulsione, quindi un veicolo ibrido con un power train elettrico si chiama HEV. Generalmente con HEV si intende un veicolo con propulsione a gasolio, affiancato da un motore elettrico più piccolo ricarica una piccola batteria durante le frenate, questa energia verrà utilizzata durante la marcia in piccoli tratti, o per per migliorare l'efficienza totale della vettura: ad esempio cercando di mantenere il motore sempre nella sua regione di massima efficienza (Fig. 1.4).

Tra i veicoli più apprezzati nel mercato al momento troviamo i Plug-In HEV (PHEV), sono molto simili agli HEV, ma danno la possibilità di poter caricare la batteria non solo da un motore termico interno, ma anche da una fonte di elettricità esterna (come per i BEV). Oltre a migliorare l'efficienza energetica del motore termico, danno la possibilità di transitare utilizzando la trazione elettrica per tratti maggiori rispetto ad un normale HEV, in questo modo nelle piccole percorrenze è possibile sfruttare la comodità di una trazione elettrica, e di non avere grandi preoccupazioni quando si viaggia per percorrenze più lunghe. Lo svantaggio principale di questi PHEV è il prezzo che si alza all'aumentare della capienza dell'accumulatore.



Figura 1.4: Esempio di caratteristiche e regione di operazione ottimale di un motore termico [8]

1.1.3 FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle

I veicoli FCEV sono molto simili agli BEV, il power train è composto da una propulsione elettrica, la differenza fondamentale risiede nell'accumulazione dell'energia che cambia completamente. Come suggerisce il nome, Fuel Cell Electric Vehicle, questi veicoli accumulano l'energia all'interno delle cosiddette pile a combustibile: queste sono dei dispositivi elettrochimici che permettono di ottenere l'energia elettrica direttamente da certe sostanze, tipicamente idrogeno ed ossigeno, senza però che avvenga alcun processo di combustione termica.

Ci sono molti tipi di pile a combustibili, ma fondamentalmente funzionano tutte grazie al processo di elettrolisi:

$$2H_2O(l) \to O_2(g) + 2H_2(g)$$
 (1.1)

In questa reazione una corrente fornisce l'energia di attivazione mentre scorre attraverso dell'acqua sciolta con un elettrolita, in questo modo si verrà a formare ossigeno ed idrogeno (Fig. 1.5).

Se il processo viene invertito, avviene la reazione tipica della pila a combustibile:

$$O_2(g) + 2H_2(g) \to 2H_2O(l)$$
 (1.2)

l'idrogeno si ionizza e rilascia elettroni all'interno degli elettrodi e si viene a generare della corrente se inseriamo un carico nel circuito, mentre l'ossigeno (preso dall'aria ambientale) e i rimanenti ioni di idrogeno (H^+) si combinano per formare l'acqua:

$$O_2(g) + 4H^+(g) + 4e^- \to 2H_2O(l)$$
 (1.3)

Il reale vantaggio di accumulare energia in questo modo è quello di evitare tutti i problemi causati dalla ricarica lenta che avviene con un pacco batteria agli ioni



Figura 1.5: Relazione tra elettrolisi e la sua reazione contraria, quella che avviene nelle celle a combustibile [9]

Fuel cell

Electrolysis of water

di litio (una pieno di idrogeno avrebbe bisogno di 5 minuti), oltre a questo, le pile a combustibile vengono molto apprezzate nell'ambito aeronautico ed aerospaziale grazie alla loro alta energia specifica rispetto ad una batteria agli ioni di litio.

Questa promettente tecnologia si scontra con il fatto che gli studi in questo ambito sono ancora giovani, per questo la costruzione di un FCEV risulta assai complesso, nonché costoso, anche se le aziende automobilistiche giapponesi sembrano già credere in questo studio, mettendo in commercio veicoli di trasporto cittadino come autobus, barche ed automobili.

Una critica che viene posta alle pile a combustibile è che non è possibile trovare l'idrogeno in natura, quindi questo deve essere prodotto mediante l'elettrolisi: il trasporto così risulta molto inefficiente, considerando il costo energetico della reazione chimica più tutto quello dovuto allo stoccaggio e alla distribuzione.

Un'ulteriore critica poco affrontata è quella rivolta al consumo di acqua delle fuel cell: come ha commentato Martin Schulz (ricercatore Infineon) in una discussione su researchgate.net [10], "Se alimentassimo ad idrogeno tutti gli aerei in partenza da Francoforte, servirebbe tutta l'acqua potabile dalla stessa città di Francoforte". Un utente nella stessa discussione facendo alcuni calcoli commenta "Per l'aereoporto di Francoforte sarebbero: 1400 voli giornalieri * 100t di gasolio /3 *9 = 422000t d'acqua ··· Sono molti(i litri d'acqua), circa il 100% del consumo di acqua fresca a Praga".



Figura 1.6: Confronto tra l'energia specifica di combustibile fossile, fuel cell, e batterie Li-ion. Dati intertek [18]

1.2 Parti fondamentali di un BEV

In questo capitolo si darà una generale descrizione dei più importanti componenti che compongono un veicolo elettrico a batteria. In Fig. 1.7 una panoramica dei componenti più importanti di un BEV



Figura 1.7: Componenti fondamentali di un BEV [11]



Figura 1.8: Schema di Fiat Panda Elettra con motore DC (1990)

1.2.1 Motore Elettrico

Il motore è un componente fondamentale per tutti i tipi di veicolo, fornisce la trazione alla vettura ed è responsabile della gran parte dell' efficienza dei consumi e del comfort di guida, nonché delle prestazioni dell'auto.

Nel campo dei BEV, i motori elettrici possono essere di diversi tipi:

- Motori DC
- Motori ad induzione (IM)
- Motori Sincroni (SR)
- Motori a magneti permanenti

Ognuno di loro possiede dei vantaggi e degli svantaggi nel loro utilizzo

Motori DC

Utilizzati solo nei primi veicoli elettrici in commercio come la Fiat Panda Elettra in Fig. 1.8, questo tipo di motore è apprezzato per la facilità di controllo, ma possiede diversi lati negativi che non lo fanno preferire alle altre soluzioni: una tra queste è il fatto che utilizzi delle spazzole per la commutazione di circuito, questo comporta sia ad un rischio per le scintille che si vengono a creare durante la commutazione, sia la necessità della manutenzione delle spazzole stesse che rende il veicolo inevitabilmente più soggetto a rotture e guasti.

Motori ad induzione

Anche chiamato motore asincrono (Fig. 1.9), è apprezzato nell'industria degli EV per il basso costo, la sua affidabilità, la sua ridotta necessità di manutenzione e l'alta efficienza nella regione a potenza costante. I lati negativi risiedono nella scarsa



Figura 1.9: Motore ad induzione [12]

efficienza alle basse velocità, ed il suo controllo risulta essere complesso.

Nonostante questi problemi, l'industria è molto interessata a questo tipo di motori, perché non hanno bisogno di materiali rari con i quali produrre i magneti permanenti, e quindi il costo risulta molto ridotto.

Molte ricerche si stanno affrontando per aggiornare il design di questi motori, migliorandone le prestazioni a basso regime e introducendo tecniche di controllo più semplici ed affidabili.

Motori Sincroni

I motori sincroni, o a riluttanza, sono molto poco costosi e non necessitano di materiali rari per essere costruiti, oltre a questo le caratteristiche coppia-velocità sono molto appetibili per le applicazioni automotive.

Al contrario di come si possa pensare, questi motori sono molto poco utilizzati dalle case automobilistiche, questo è dovuto da alcune caratteristiche meccaniche ancora irrisolte dagli studiosi del design: sono difficili da costruire, hanno bisogno di un



Figura 1.10: Motore sincrono a riluttanza variabile [13]



Figura 1.11: Motore sincrono a magneti permanenti [14]

inverter molto grande per le difficoltà del suo controllo, e alle alte velocità soffrono di problemi acustici e di ripple di coppia.

Anche in questo caso il mercato è molto interessato all'utilizzo di questi motori, e si stanno studiando diverse soluzioni ai problemi riportati.

Motori a magneti permanenti

I più costosi di tutti, a causa dei magneti che vengono costruiti con materiali rari, sono anche i più ambiti ed utilizzati grazie alla loro alta efficienza, alta densità di coppia ed alta affidabilità. Negli ultimi anni molti produttori si stanno allontanando dalla costruzione di questi motori, nonostante rimangano la soluzione migliore fin quando non verranno rimpiazzati. Anche tesla dopo la sua Model 3 ha modificato la sua linea di produzione a favore dei motori a magneti permanenti [19]. In Fig. 1.11 è possibile apprezzare le dimensioni compatte di questo tipo di motore.

Il futuro: in-wheel motor

Il futuro nel campo dei motori elettrici per i veicoli di trasporto delle persone sono sicuramente gli in-wheel motor: il principio che sta alla base di questi motori è praticamente la stessa dei tradizionali motori che vengono montati sull'albero, mentre in questo caso la trazione viene direttamente fornita alla ruota tramite un moto riduttore senza passare per un albero di trasmissione. Questo tipo di approccio viene apprezzato molto per il suo design compatto (motore ed impianto frenante tutto nello stesso package), e quindi riesce ad abbassare il peso complessivo del veicolo.

Una soluzine commerciale che si sta sviluppando è Elaphe L1500 (Fig. 1.12), un in-wheel motor con raffreddamento a liquido sincrono a magneti permaneti. Questo motore fa parte dei componenti di EVC1000 [20], cioè il progetto europeo Electric Vehicle Components for 1000 km daily trips (EVC 1000), che riunisce dieci partecipanti provenienti da ambienti industriali ed accademici per fornire componenti

L1500

The most powerful compact in-wheel motor ever produced. With an integrated standard disc brake, a standard outer caliper and a standard hub bearing, it is designed to fit the original vehicle knuckle due to an innovative packaging concept. It also comes with an integration of EPB.

Built for high-power requirements, versatility and customization, this motor fits perfectly to new mobility solutions, pickup-trucks, SUVs and powerful sedans.

	370V nominal
Added weight	34,8 kg
Peak torque	1500 Nm
Continuous torque	650 Nm
Top speed [at nominal voltage]	1480 rpm
Peak power [at nominal voltage]	110 KW
Continuous power [at nominal voltage]	77 kW (liquid cooling)



Figura 1.12: Elaphe L1500 [15]

innovativi e soprattutto efficienti per lo sviluppo della futura mobilità elettrica. I principali vantaggi del motore L1500 sono:

- Trazione diretta.
- Coppia specifica migliore nel mercato.
- Alta efficenza energetica.
- Peso contenuto e design compatto.
- Frenata rigenerativa.
- Design modulare, compatibile con la maggior parte dei veicoli in commercio, con poche parti in movimento e con la possibilità di installare un impianto frenante a disco.

Necessitando di una quantità inferiore di parti mobili la sua efficenza meccanica è molto alta, del 94% per il solo motore, che passa a 92.5% tenendo conto di tutte le perdite meccaniche della ruota.

1.2.2 Inverter

L'inverter è un elemento molto delicato dei BEV e più in generale degli EV, questo ha il compito di convertire la tensione DC dalle batterie, in AC. La corrente che alimenta il motore deve essere appositamente sfasata, modulata, e ad una certa frequenza, questo gli permette di controllare efficacemente il motore AC. È un componente praticamente obbligatorio, dato che nell'ambito EV quasi la totalità dei motori funzionano in corrente alternata (un esempio di motore in corrente alternata in Fig. 1.13).



Figura 1.13: Motore trifase e le tre onde di corrente [16]



Figura 1.14: Schema di un inverter a 3 fasi [16]

In Fig. 1.14 uno schema semplificato di un inverter a 3 fasi che controlla un motore in configurazione a stella: l'onda di tensione viene generata facendo commutare appositamente i mosfet dell'inverter. I motori trifase variano i propri giri a seconda della frequenza della corrente in uscita dall'inverter, mentre la coppia ne viene controllata dall'ampiezza. La particolarità di questo strumento è quella di dover pilotare una grande quantità di potenza, pur necessitando di avere un'uscita sinusoidale che sia più precisa possibile, questo lo rende un oggetto ingegneristicamente molto complesso, che va a fondere l'elettronica di potenza, con le complicate leggi di controllo di un motore.

L'inverter ha un grande impatto sull'efficienza del veicolo, prima di tutto deve pilotare gli interruttori che commutano le correnti in modo più efficiente possibile, oltre a questo ha anche la funzione di gestire la rigenerazione della corrente in frenata, quindi di ricaricarne le batterie.

Inverter DIDIMO

Di nuovo, troviamo tra i componenti dell'EVC1000 l'esempio di un inverter particolarmente efficiente, questo è il DIDIMO(Fig. 1.15, cioè Dual Inverter Developed at Ideas & MOtion. Sviluppata dall'italiana Ideas & Motion, questo componente fonde il funzionamento di due inverter in un singolo package, a vantaggio della compattezza all'interno del veicolo, e dell'efficienza energetica.



Figura 1.15: Prototipo dual inverter DIDIMO [17]

Oltre a tutta la gestione del controllo, nello stesso package viene dato il supporto ad una grande varietà di sensori (angolari, temperatura, corrente ecc...) e numerose protezioni per il motore. Per un confronto, in Tabella 1.1 vengono mostrate le caratteristiche elettriche del DIDIMO

Maximum peak phase current (10s)	500	$A_{\rm RMS}$
Continuous phase current	230	$A_{\rm RMS}$
Input DC link voltage range	up to 600	V
Maximum peak input power (10s)	2x 125	kW
Continuous input power	2x 65	kW
Switching frequency	Up to 40	kHz

Tabella 1.1: Caratteristiche elettriche inverter DIDIMO [17]

1.2.3 Pacco batteria

La caratteristica che contraddistingue tutti i BEV è il pacco batteria, questo è l'unica fonte di energia dal quale i motori possono richiederne.

Batteria automobilistica o Li-ion?

Le specifiche dell'accumulatore è uno dei parametri fondamentali al momento dell'acquisto di un BEV, da questo possiamo conoscere l'autonomia dell'automobile, la velocità di ricarica, e talvolta anche la vita stimata di tutto l'accumulatore. Le batterie di un EV sono molto diverse rispetto ad una classica batteria automobilistica: quest'ultime infatti sono anche dette "SLI", che sta per starting, lighting, and ignition, questo ci fa intuire come le specifiche che dovranno rispettare sono diverse e sicuramente meno restrittive per una batteria di un EV.



Figura 1.16: Diverse batterie vendute nello store online rs [21]

Storicamente le batterie SLI sono batterie elettrochimiche del tipo lead acid, questo per una semplice costi, mentre per un BEV vengono utilizzate delle batterie agli ioni di litio, più costose, ma con le migliori caratteristiche fisiche ed elettriche attualmente disponibili nel commercio. Un approfondimento sulle batterie Li-ion ln Sezione 2.2, mentre in Tabella 1.2 un breve confronto tra le chimiche lead acid e Li-ion.

	Lead Acid	Lithium Polimer
Costo iniziale per capacità (\$/kWh)	131	530
Costo iniziale per ciclo di vita (\$/kWh)	0.17	0.19
Energia specifica Wh/kg	30-50	100-270
Cicli di vita	200-300	600-3000
Self discharge	5%/mese	3-10%/mese
Tempo di ricarica	8-16h	2-4h

Tabella 1.2: Confronto tra batterie lead acid e Li-ion [23]

Configurazione

Gli accumulatori basati su batterie Li-ion sono formati da più moduli in serie, a loro volta formati da singole celle di batterie Li-ion in configurazione serie parallelo, la configurazione conferisce la caratteristica di tensione e di capacità del pacco batterie (come in Fig. 1.17). Un comune pacco batterie è formato da blocchi di 18-30 celle in parallelo, che inseriti in serie ci forniscono la tensione desiderata. Ad esempio con 96 serie si ottiene un pacco da 400V nominali (come tesla model s).



Figura 1.17: Esempio configurazione serie-parallelo di batterie

Collocazione e dimensione dell'accumulatore

Per ottenere un buon range di un BEV abbiamo bisogno di dimensionare in maniera meticolosa il pacco batterie: un accumulatore molto grande garantisce una grande quantità di energia immagazzinata, ma allo stesso tempo aumentano molto il peso ed il volume, a scapito dell'efficienza e dello spazio da dedicare agli altri componenti del veicolo.

Solitamente l'accumulatore viene integrato nel pianale dell'automobile (Fig. 1.18), questo permette al veicolo di abbassare il proprio baricentro, e di sfruttare una superficie maggiore per il raffreddamento delle celle.

Temperatura delle celle

La produzione di energia di una cella agli ioni di litio è data da reazioni chimiche che sono soggette alla temperatura, per garantire la massima efficienza questi delicati dispositivi hanno bisogno di mantenersi in un range di temperatura ideale per il quale il produttore ne garantisce le massime prestazioni elettriche e dinamiche. Solitamente il range di funzionamento di una batteria Li-ion è di -16 °C ~ 60 °C, ma è stato osservato che il loro range ottimale si aggira attorno a 15 °C ~ 35 °C, ed è molto importante cercare di rimanere attorno a questi valori. La chimica e il



Figura 1.18: Accumulatore di tesla model S [22]

comportamento delle celle Li-ion verranno approfondite nella Sezione 2.2.

Il sistema più economico per il controllo della temperatura è quello ad aria (Fig. 2.18 (a)): un sistema ad aria passivo utilizza il movimento della vettura per creare un flusso d'aria all'interno delle celle, mentre un sistema attivo è più efficace ed utilizza un sistema di ventole per movimentare il flusso d'aria anche se il veicolo è fermo. Questo tipo di soluzione è il più semplice ed economico, in più rende il pacco batteria più leggero perchè non ha bisogno di liquidi, pompe e tubi.

Un sistema a liquido è sicuramente più efficace rispetto a quello ad aria, questo a discapito del fatto di essere più complesso da ingegnerizzare e più pesante. Ad esempio Tesla ha brevettato un sistema a liquido per raffreddare le sue batterie (Fig. 2.18(b)) una serpentina distribuisce per tutto il pacco batteria un liquido antigelo (a base di Glycol) refrigerato a secondo delle necessità, questo sistema risulta molto efficace.

Una successiva iterazione tecnologica potrebbe essere quella di non utilizzare le serpentine ed immergere le batterie direttamente in un liquido refrigerante, questo riduce il peso dell'impianto di refrigerazione e ne migliora l'efficienza del contatto termico. È ancora presto per avere nel mercato questo tipo di soluzione, ma in Fig. 2.18(c) possiamo vedere un render di un prototipo di un modulo prodotto da XING Mobility che utilizza proprio questa tecnologia.



(c) Prototipo di raffreddamento ad immersione XING Mobility

Figura 1.19: Diverse modalità di raffreddametno [24]



Figura 1.20: Dev board di un bms da STMicroelectronics [25]

Battery Management System

La singola cella in se è soltanto uno strumento elettrochimico capace di accumulare energia elettrica senza alcun tipo di intelligenza o circuiteria che ne controlla il funzionamento, per questo motivo in ogni pacco batteria trova posto il Battery Management System (BMS), un circuito che si occupa di controllare e gestire tutte le celle durante la carica e la scarica.

Un bms deve poter svolgere molte funzioni di sicurezza e di controllo, per questo il circuito può risultarne anche molto complicato (Fig. 1.20). Le principali funzioni di sicurezza che non devono mancare sono:

- Under-Over voltage protection.
- Under-Over temperature protection.
- Over current protection.
- Cell balancing.
- State Of Charge and dello State Of Health measurment.

Un buon BMS oltre alle funzioni protezione, ha anche la possibilità di comunicare con l'esterno, in questo modo è possibile effettuare l'euristica degli errori o dei problemi che potrebbero avvenire, e potremmo integrare le informazioni del bms con il resto della telemetria.

Nelle applicazioni con un ridotto numero di serie nel pacco è possibile utilizzare dei circuiti (solitamente pre-fabbricati) che integrano tutto il controllo in un unico package, nell'ambito automotive invece c'è bisogno di controllare un numero elevato di celle, quindi si opta per un sistema master-slave.

In un sistema master-slave abbiamo un circuito master che agisce da cervello del BMS, qui solitamente sono salvati tutti gli algoritmi per il controllo e le misure delle celle. Gli slave invece sono collegati a valle del master, ed eseguono le istruzioni dettate da questo come le misurazioni di tensioni, temperature ed attivazioni del bilanciamento.

Il bilanciamento durante la carica è necessario affinché si garantisca che tutte le celle arrivino al 100% dello State Of Charge, senza eccedere il loro valore di tensione massimo(tipicamente 4.2 V per le celle Li-ion). Questo serve perché con il passare del tempo e dei cicli di carica le celle subiscono un processo di deterioramento, che non è uguale per tutte, quindi avremo bisogno di fornire ad ogni cella una quantità diversa di energia.

Il processo di bilanciamento può avvenire in due modi: passiva o attiva.

Il bilanciamento passivo è il più semplice ed utilizzato: durante la carica vengono controllate le tensioni di tutte le celle, viene selezionata la cella (o le celle) con un valore troppo alto di tensione rispetto alle altre, quindi ne viene collegata ai capi una resistenza di scarica. In questo modo parte della corrente che sarebbe fluita all'interno della cella passa attraverso la resistenza, di conseguenza la carica della cella in questione viene rallentata rispetto a tutte le altre.

Lo svantaggio di questo approccio è che all'interno della resistenza l'energia viene trasformata totalmente in calore, quindi questa risulta energia sprecata.

Il bilanciamento attivo invece si basa sul trasporto della carica cella per cella, in questo modo non viene sprecata energia durante il bilanciamento, e non viene prodotto calore dalle resistenze di scarica. Questo design non è semplice da realizzare, solitamente si usano dei convertitori DC/DC per assegnare la giusta tensione a ciascuna cella. Un circuito di bilanciamento attivo risulta essere anche più costoso



Figura 1.21: Bilanciamento passivo (sinistra) e attivo (destra) [26]

rispetto alla controparte passiva, aggiungendo il fatto di non portare un miglioramento tangibile dei tempi di carica, questo solitamente non viene utilizzato. In Fig. 1.21 un confronto tra i due tipi di bilanciamento citati.

Un'altro modo di categorizzare un BMS può essere fatto guardando la comunicazione interna tra master-slave, questa può avvenire sia in maniera wired, che solitamente adotta un collegamento di tipo in daisy chain, oppure tramite una tecnica più avanzata come la cumunicazione wireless: più complessa da implementare, ma più leggera e scalabile.

Capitolo 2 Batterie elettrochimiche

Le batterie elettrochimiche sono così chiamate perchè permettono di produrre energia elettrica tramite le reazioni chimiche dei reagenti contenute in esse, le più importanti ed efficienti al momento sono quelle basate sugli ioni di Litio. Entrando nel dettagluio, le batterie elettrochimiche producono energia con una ossido-riduzione (redox) spontanea. Una reazione redox avviene quando degli elettroni sono trasferiti da una sostanza che viene ossidata (anodo -, cede elettroni) ad una sostanza che viene ridotta (catodo +, acquisisce elettroni). Una cella che produce energia sfruttando la reazione redox spontanea è detta cella galvanica, al contrario, una cella che assorbe energia da una fonte esterna causando la stessa reazione redox in maniera inversa (non spontanea) è detta cella elettrolitica.



Figura 2.1: Esempio di cella Galvanica ed Elettrolitica [27]



Figura 2.2: Pila Daniell [27]

Nella cella galvanica entrambi gli elettrodi (anodo e catodo) sono collegati da un circuito che permette agli elettroni di spostarsi da anodo a catodo e far avvenire la ossido-riduzione. Gli elettrodi sono anche collegati da una sostanza elettrolite, che permette agli ioni di muoversi liberamente e di mantenere la neutralità del sistema. In Fig. 2.2 l'esempio di una cella galvanica molto semplice, la pila Daniell: usa lo zinco ed il rame come elettrodi, un ponte di sale invece come elettrolite.

2.1 Confronto tra le diverse chimiche

Le batterie elettrochimiche possono essere formate da diversi mix chimici, ed ogniuno di essi ha i propri vantaggi e svantaggi.

In questa sezione si andranno ad analizzare solo le batterie secondarie, cioè quelle che possono essere ricaricate.

Lead Acid

Sono le più vecchie batterie ricaricabili, molto robuste, resistenti agli stress ed ormai molto poco costose. Hanno una bassa energia specifica, un ciclo di vita ridotto, e la ricarica è molto lenta, questo le rende non ottimali per un'applicazione BEV, ma vengono comunque molto usate in altri ambiti meno pretenziosi per via del loro basso costo ed il loro smaltimento più semplice.

	- High specific energy and high load capabilities with Power Cells
D	- Long cycle and extend shelf-life; maintenance-free
Pro	- High capacity, low internal resistance, good coulombic efficiency
	- Simple charge algorithm and reasonably short charge times
	- Low self-discharge (less than half that of NiCd and NiMH)
	- Requires protection circuit to prevent thermal runaway if stressed
Contro	- Degrades at high temperature and when stored at high voltage
	- No rapid charge possible at freezing temperatures (below $0 ^{\circ}\text{C}$)
	- Transportation regulations required when shipping in larger quantities

Tabella 2.1: Pro e contro Li-ion [30]

Nickel-cadmium NiCd

Anche esse abbastanza mature, sono usate quando c'è bisogno di molti cicli di vita, correnti di scarica alte, e temperature estreme. Grazie alla loro particolare robustezza sono le migliori nelle applicazioni più delicate come quelle aereospaziali o mediche, ma non vengono utilizzate negli altri ambiti meno specifici: sia per la loro bassa energia specifica, che per la tossicità del cadmio (Cd).

Nickel-metal-hydride NiMH

Create per sostituire le NiCd, integrano solo metalli leggermente tossici, e possiedono una migliore energia specifica (30-40%). Rispetto alle NiCd hanno un ciclo vitale minore, un alto tasso di auto-scarica¹, ed hanno bisogno di un circuito di protezione per la carica essendo molto sensibili alle sovra cariche. Sono disponibili anche in formati per l'uso domestico, ma non trovano spazio nelle applicazioni automotive.

Lithium-ion Li-ion

Sostituiscono le batterie al nikel in molte applicazioni: il vantaggio principale rispetto a tutte le altre è l'alta energia specifica, ed evolvendosi stanno guadagnando anche una buona robustezza. In Tabella 2.1 le caratteristiche principali di una cella Li-ion.

Nelle applicazioni automotive il pacco batteria ha un grande impatto sul peso e la

¹l'auto-scarica (self discharging) è il tasso di carica che la cella perde quando non è utilizzata (in the bookshelf)

dimensione della macchina, per questo le batterie agli ioni di litio rappresentano la soluzione migliore per quanto riguarda questo tipo di applicazione. La Fig. 2.3 mostra come la scelta migliore sia da un punto di vista volumetrico/energetico(a), ma anche da quello della potenza per energia(b).





(b) potenza specifica/energia specifica [29]

Figura 2.3: Grafici di confronto tra chimiche diverse



Figura 2.4: Flusso degli ioni in una batteria Li-ion [30]

2.2 Cella agli ioni di litio

La chimica che ad oggi risulta la migliore disponibile nel mercato e quella delle celle Li-ion, in questa sezione questa viene descritta in modo più dettagliato.

2.2.1 Reazione chimica

Il catodo di una cella agli ioni di litio è composta da un ossido di metallo di transizione "litiato" $(Li_{1-x}M_yO_z)$, l'anodo è un composto litio-carbonio (Li_xC) , ed una soluzione organica liquida (o un polimero solido) è utilizzato come elettrolite. La reazione elettrochimica generale può essere descritta come:

$$Li_x C + Li_{1-x} M_y O_z \leftrightarrow C + Li M_y O_z \tag{2.1}$$

Dove M_y è un metallo di transizione.

Durante la scarica, gli ioni di litio vengono rilasciati dall'anodo, migrano attraverso l'elettrolite, e vengono catturati dal catodo. In carica il processo è invertito.

La chiave per un alto valore della capacità sta nel catodo, infatti le celle sono caratterizzate dal metallo utilizzato all'interno di esse. I materiali più comuni che possiamo trovare nel catodo sono:

- Lithium Cobalt $Oxide(LiCoO_2) LCO$
- Lithium Manganese Oxide $(LiMn_2O_4)$ LMO
- Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide $(LiNiMnCoO_2)$ NMC
- Lithium Iron Phosphate $(LiFePO_4)$ LFP
- Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (*LiNiCoAlO*₂) NCA
- Lithium Titanate (Li_2TiO_3) LTO



Batterie elettrochimiche

Figura 2.5: Confronto tra le più comuni chimiche per le batterie Li-ion [31]



Figura 2.6: Confronto dell'energia specifica tra le celle più comuni [30]

Per raggiungere la più alta autonomia possibile le case automobilistiche come Tesla utilizzano la chimica NCA, che ha un ottimo potenziale di sviluppo, e come è possibile vedere in Fig. 2.6 e Fig. 2.5 è quella con l'energia specifica maggiore. L'anodo invece è composto da una struttura in grafite, anche se negli ultimi anni si stanno studiando altri materiali composti da silicio o da nano strutture in litio-titanio.



Figura 2.7: Li-ion Button cell panasonic [32]

2.2.2 Package

Le celle elettrochimiche condividono più o meno gli stessi package, comprese le batterie Li-ion, che possono essere trovati in diverse dimensioni con le loro caratteristiche fisiche

Button cell

Le classiche batterie incluse negli orologi, ideate per applicazioni con poco spazio a disposizione. Fig. 2.7

Cylindrical cell

È il tipo di cella più utilizzata in questo momento nel mercato delle batterie, soprattutto per la semplicità di produzione e per la loro buona stabilità meccanica. La chimica è custodita da un involucro cilindrico in alluminio rigido, questo conferisce una buona resistenza ai fattori esterni, ed una maggiore robustezza rispetto alle avarie interne (come per casi di corto circuiti o altri tipi di errori casuali).

Gli utilizzi più comuni variano tra applicazioni nei laptop, strumentazione medica ed EV.

Queste celle si differenziano, oltre che per la chimica, anche per la loro grandezza, il formato cilindrico più popolare è sicuramente quello delle 18650 (18 mm diametro,



Figura 2.8: Cella cilindrica 18650 [30]

65 mm altezza).Fig. 2.8

Questo tipo di cella offre degli ottimi costi specifici $[kWh/\epsilon]$ ed una buona affidabilità dovuta ad una lunga storia nel mercato delle batterie.

Come molti componenti elettronici, anche per queste celle non è raro vedere degli aggiornamenti nel tempo, come ad esempio il nuovo formato 21700 che sta man mano prendendo piede nel mondo dell'automotive.

Prismatic cell

Sono delle celle utilizzate in applicazioni dove c'è poco spazio a disposizione, come ad esempio nei celulari.

Non hanno una grandezza standard, ogni produttore ne decide la forma e la capacità, e solitamente hanno un involucro di metallo rigido.

Va fatto presente che queste celle sono disponibili anche in formati più grandi, così da poter essere utilizzati nell'ambito dell'EV. Fig. 2.9

Pouch cell

Di recente invenzione, queste batterie abbandonano il guscio rigido di metallo a favore di una costruzione più leggera e flessibile. Questo nuovo tipo di celle hanno consentito ad una maggiore efficienza spaziale e di peso, a scapito della semplicità di design del pacco batteria: questo dovrà garantire una robustezza ai danni fisici, e allo stesso tempo dovrà tenere conto degli spazi necessari alla cella per espandersi durante l'utilizzo.

Situazioni di stress come il calore o importanti variazioni di umidità potrebbero essere più pericolose rispetto a delle batterie con un involucro rigido, infatti una cella pouch oltre ad essere soggetta maggiormente ai fattori esterni potrebbe per qualche motivo (cortocircuito, errori ecc...) espandersi fino a lacerare con facilità l'involucro ed esplodere.



Figura 2.9: Cella Prismatica [33]



Figura 2.10: Pouch cell [30]

Non esistono misure standard, ogni produttore ne decide il design. Questo tipo di cella teoricamente offre una maggiore capacità specifica rispetto alle celle prismatiche e cilindriche, ed il costo di queste si sta allineando alle controparti più vecchie nel mercato. Fig. 2.10

2.3 Modello circuitale equivalente - ECM

Quando si lavora con l'elettronica siamo abituati a tenere in considerazione sempre la differenza tra un elemento ideale e la controparte fisica, che avrà le proprie caratteristiche e la propria dinamica limitata; questo vale anche per le batterie elettrochimiche.

Il metodo più accurato per descrivere una cella Li-ion è il modello elettrochimico: questo però è molto complesso e per essere utilizzato ha bisogno di una grande potenza di computazione. Un modello più semplice è quello matematico, che si basa ad esempio sull'uso do metodi stocastici, può essere però usato solamente in applicazioni che non richiedono una grande precisione.

Le celle Li-ion solitamente vengono rappresentate dal circuito equivalente in Fig. 2.11, questo modello ci da una buon compromesso tra complessità e accuratezza.

Questo modello, chiamato 2RC, è composto da una resistenza caratteristica R_0 , e da un circuito RC del secondo ordine che ne descrive la dinamica.

- $\bullet~U_{\rm oc}$ è un generatore di tensione che rappresenta la tensione a circuito aperto
- R₀ è la resistenza interna
- Il blocchi di circuito RC rappresentano invece il ritardo nella risposta della tensione



Figura 2.11: Modello 2RC di una cella Li-ion [34]

I parametri del circuito RC sono usati per modellare la risposta transitoria. R_1 e R_2 sono i contributi faradaici alla resistenza interna, mentre C_1 e C_2 rappresentano l'effetto superfice della cella e la dinamica interna di questa. Naturalmente dall'esterno è possibile misurare unicamente la tensione ai terminali della batteria U_t , quindi a meno che non siamo in condizioni statiche non riusciamo ad ottenere alcuna informazione sui parametri interni della batteria.

2.3.1 Dinamica in scarica

La tensione ai capi di una batteria Li-ion in scarica (come in carica) ha dei comportamenti non lineari. In Fig. 2.12 è rappresentato il comportamento dinamico ideale di una cella alla quale viene collegato un carico costante: tipicamente U_t scende rapidamente dal valore V_{full} a quello di V_{exp} , questo avviene nella prima parte della scarica della cella (dal 100% all'80% della carica). Per il restante funzionamento della cella, U_t si mantiene ad un valore pressoché costante V_{nom} , che è il valore di tensione nominale dichiarata dal produttore. La tensione nominale viene mantenuta fino ad arrivare al 20% della carica, dove U_t cade molto rapidamente fino al



Figura 2.12: Curva di scarica ideale [35]
valore V_{cutoff} , il valore che indica la cella completamente scarica.

È molto importante mantenere il valore della tensione dei terminali della cella in un valore compreso tra $V_{full} \in V_{cutoff}$, altrimenti si rischia di danneggiarne irreparabilmente la chimica contenuta all'interno di essa.

Ovviamente la dinamica di una batteria dipende non solo dal carico ai terminali della cella, ma dipende anche dai parametri interni della cella, della temperatura alla quale sta operando, e dal carico abbiamo posto ai capi. Un esempio concreto lo abbiamo nel grafico dimostrativo di scarica che i produttori di batterie agli ioni di litio inseriscono all'interno dei datasheet, come quello in Fig. 2.13 che mostra il comportamento della cella Samsung ICR18650-22 con diversi carichi(a) e a diverse temperature(b). Per quantificare la scarica è comodo utilizzare il C rate: misura



Figura 2.13: Grafici di scarica Samsung ICR18650-22 [36]



Figura 2.14: Tensione di una batteria Li-ion LFP in risposta ad un impulso di corrente di scarica a differenti C-rate [37]

la velocità alla quale stiamo scaricando o caricando una batteria, è definita come la corrente che attraversa la batteria diviso dalla corrente nominale che la batteria sarebbe in grado di rilasciare in un'ora.

$$Capacity = C - rate(Ampere) \cdot Time(Hours)$$

Collegando un carico per un intervallo di tempo più breve, possiamo notare le il comportamento transitorio della cella dovuto ai gruppi RC.

Come è possibile osservare in Fig. 2.14, la risposta ad un impulso di corrente di scarica mostra innanzitutto un calo di tensione ai terminali dovuto alla resistenza interna, quando poi il carico viene scollegato dobbiamo aspettare un certo lasso di tempo (rilassamento) affinchè la tensione ai capi della cella torni al valore di tensione a circuito aperto (Open Circuit Voltage OCV).

2.3.2 Dinamica in carica

La carica delle batterie agli ioni di litio può avvenire in diversi modi, alcuni più efficienti o più veloci di altri.

Utilizzare un algoritmo di carica migliore significa risparmiare tempo durante la carica, che può portare anche ad una vita della batteria più lunga.

L'algoritmo che solitamente viene utilizzato è il CC/CV (Costant Current Costant Voltage), non è l'algoritmo più efficiente e veloce, ma è quello più semplice da implementare nonchè il meno complesso computazionalmente. Come è possibile



Figura 2.15: Algoritmo CC/CV in una batteria Li-ion [30]

vedere in Fig. 2.15 l'algoritmo inizialmente fornisce alla cella una corrente costante: solitamente in questa fase non si eccede il valore di 1C. Una volta che ai terminali della celle la tensione arriva alla propria tensione di soglia V_{max} (tipicamente 4.2V) si procede con la seconda fase di Tensione Costante: il caricatore limita la propria tensione a quella di soglia, e man mano che la batteria viene ricaricata la corrente diminuisce.

E possibile notare come il raggiungimento della soglia di tensione nella prima fase è molto più veloce del completamento della seconda, considerando che raggiungere la soglia di tensione significa raggiungere circa il 70% dello SOC, il nostro algoritmo impiega molto meno tempo a caricare la cella dallo 0% fino al 70%, rispetto a quanto ne impiega per completare la carica dal 70% al 100%.

2.3.3 Estrazione dei parametri

Il limite del modello 2RC sta nei parametri che rappresentano la cella: questi non sono statici, e cambiano a seconda di diversi fattori come la temperatura e lo SOC. Individuare questi parametri non è un task banale, per fare ciò però possiamo sfruttare le caratteristiche transitorie della batteria.

Una tecnica molto utilizzata è quella degli impulsi di corrente, in questa sezione è riportato a scopo dimostrativo l'algoritmo proposto dall'università di torino [38]. In questo studio l'estrazione viene effettuata in diversi passaggi:

Batterie elettrochimiche



Figura 2.16: Capacity test con la cella ANR26650M1-B [38]

(a) Preconditioning test

Vengono effettuate tre cariche/scariche complete a 0.5C a temperatura ambiente. A fine di ogni carica/scarica la cella viene lasciata riposare per 90 minuti. L'intero processo dura 24h.

(b) Capacity test

Viene calcolata la capacità effettiva della cella con un test: viene effettuata una carica in CC/CV con un basso valore della corrente, ad esempio a C/5. La carica viene fermata quando si raggiunge la tensione di soglia e la corrente raggiunge un valore molto basso, al di sotto di C/200.

Una volta caricata, viene scaricata di nuovo ad una corrente molto bassa (C/5) fino ad arrivare alla tensione di cutoff (tipicamente 2.5V).

Misurando la capacità totale che viene rilasciata durante il test, conosciamo il valore della capacità effettiva della cella. Fig. 2.16.

(c) Relaxation test

Il test di rilassamento fornisce una visione generale della risposta dinamica della cella. La cella viene fatta scaricare fino al 50% dello *SOC* con una corrente di 2.5A (circa 1C se prendiamo in considerazione la cella ANR26650M1-B utilizzata dal politecnico di torino). Dopo aver raggiunto il 50%, viene misurata la tensione





Figura 2.17: Monitor della tensione nel Relaxation test [38]

per 20 ore, in questo modo la cella ha modo di avere un tempo di rilassamento molto lungo, riuscendo così ad ottenere un valore accurato di V_{oc} . Naturalmente 20 ore sono un tempo troppo lungo da aspettare se si vuole estrarre i parametri della cella per diversi valori di SOC (i parametri dipendono oltre che dalla temperatura della cella, dal suo sato di degradazione, ed anche dello SOC), per questo motivo la parametrizzazione viene completata con il Current pulse test.

(d) Current pulse test

In questa fase di test la cella viene sollecitata con degli impulsi di carica e di scarica, in questo modo riusciamo a ricavarne un comportamento dinamico per diversi valori di *SOC*, ma con un tempo di rilassamento più breve, quindi con un'accuratezza



(b) Tensione della cella sottoposta agli impulsi

Figura 2.18: Current Pulse Test [38]

minore.

La procedura consiste in tre parti:

- 1. Una serie di impulsi di scarica ad 1C separati da periodi di riposo di 10 minuti. Ogni impulso scarica il 5% dello SOC fino a raggiungere la tensione di cutoff. Successivamente la cella viene fatta scaricare alla tensione costante V_{cutoff} fin quando la corrente erogata dalla cella non risulta molto bassa, questo per evitare che rimanga della carica residua.
- 2. Un periodo di riposo di 10 ore per far tornare la cella al proprio equilibrio termodinamico.
- 3. Una serie di impulsi di carica ad 1C separati anch'essi da un riposo di 10 minuti. Ogni impulso carica la cella del 5% dello SOC, fino a raggiungere la tensione di soglia massima. Successivamente viene caricata alla tensione costante V_{max} fino a che la corrente non sia molto bassa, e la cella risulti completamente carica.

(e) Estrazione dei parametri

Una volta completata la fase di test, con i dati ottenuti possiamo estrarne i parametri. Come è possibile vedere in Fig. 2.19 ogni parametro della cella è responsabile



Figura 2.19: Rilassamento di una cella Li-ion [39]

di una porzione del comportamento dinamico della tensione U_t . Il primo parametro che viene estratto è l' V_{oc} , ottenuto come l'ultima tensione alla fine del rilassamento. Il parametro R_0 può essere estratto come:

$$R_0 = \frac{V_0}{\Delta I} \tag{2.2}$$

Dove ΔI è il valore dell'impulso di corrente, e V_0 è la variazione di potenziale appena dopo aver fermato l'impulso (Fig. 2.19).

Infine, i rimanenti parametri vengono estratti tramite il fitting della rimanente parte della risposta del modello 2RC, che nel tempo è un polinomio di secondo grado:

$$V(t) = V_{oc} - V_1 e^{\frac{t}{\tau_1}} - V_2 e^{\frac{t}{\tau_2}}$$
(2.3)

Il fitting può essere effettuato dall'algoritmo Least-Square in ambiente matlab [40], in questo modo abbiamo ottenuto V_1, τ_1, V_2, τ_2 , ed i parametri dei due bolcchi RC sono calcolati come:

$$R_i = \frac{V_i}{\Delta I} \tag{2.4}$$

$$C_i = \frac{\tau_i}{R_i} \tag{2.4}$$

2.4 State Of Charge – SOC

Come è possibile vedere in Fig. 2.13(a) la curva di scarica della batteria ha un comportamento non lineare; questo, assieme al comportamento transitorio della cella, rendono il calcolo dello SOC non banale, come vedremo in questa sezione sono stati implementati più di un metodo di stima dello SOC.

2.4.1 SOC – OCV

La Open Circuit Voltage (OCV) è il valore della tensione data dal generatore interno U_{oc}, conoscere questo parametro è utile perchè significa conoscere il livello di carica della batteria, infatti OCV e SOC sono correlati da una funzione lineare a tratti, in Fig. 2.20 un esempio di relazione OCV-SOC.

Come abbiamo possibile vedere in Fig. 2.14 quando siamo in contesti dinamici non è possibile conoscere la OCV, infatti possiamo solamente conoscere la tensione ai terminali della batteria e la corrente che passa all'interno di essa, per conoscere quindi lo SOC possiamo quindi operare in due modi: o facciamo trascorrere del tempo per far completare la fase di rilassamento e misurare lo soc (a seconda dell'ampiezza dell'impulso di corrente il rilassamento potrebbe impiegare ore), oppure utilizziamo dei metodi di stima dello SOC alternativi come il Coulomb Counting o il filtro di Kalman.



Figura 2.20: Relazione lineare a tratti tra $OCV \in SOC$ di una batteria Li-ion [41]

2.4.2 Coulomb Counting

Il principio di funzionamento di questo algoritmo è quello di contare nel tempo quanta carica viene rilasciata, o acquisita, dalla batteria. Per poter utilizzare questo metodo abbiamo bisogno di conoscere:

- $SOC(t_0)$: SOC iniziale
- I_b : Corrente che passa nella batteria
- C_{rated} : Capacità reale della batteria

Lo $SOC(t_0)$ è possibile ottenerlo a partire dalla tensione con la relazione soc-ocv (Fig. 2.20) solo se il pacco batterie nel lasso di tempo precedente non è stato utilizzato, quindi non è in fase di rilassamento, altrimenti dobbiamo fare affidamento all'ultimo calcolo dello SOC ottenuto durante il precedente utilizzo della batteria. I_b la possiamo misurare con un sensore di corrente, mentre C_{rated} è la capacità che ci garantisce il produttore della cella.

Se non consideriamo la perdita naturale della capacità di una batteria agli ioni di litio, possiamo scrivere la formula su cui si basa questo metodo:

$$SOC = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{rated}} \int_{t_0}^{t_0 + \tau} I_b \, dt.$$
 (2.5)

L'accuratezza di questo metodo risiede nella precisione delle misuraizoni che vengono effettuate dal sensore di corrente e dall'accuratezza della stima di $SOC(t_0)$, oltre a questo dobbiamo tenere in considearazione che durante la carica e la scarica di una cella reale ci sono sempre delle perdite, non tenendone conto potremmo ottenere una misura non precisa dello SOC. Un altro problema da tenere in considerazione è che la capacità reale della batteria non è C_{rated} , ma un valore più basso, questo a causa del naturale invecchiamento delle celle o delle condizioni ambientali (come possibile vedere in Fig. 2.13).

Per ovviare a tutti questi errori cumulativi, possiamo usare una variante del coulomb counting che periodicamente effettua la ricalibrazione della capacità reale della cella eliminando gli errori, che fino a quel punto sono stati accumulati: l'Enanched Coulomb Counting.

2.4.3 Enanched Coulomb Counting

Questa sezione è stata scritta facendo riferimento all'articolo tecnico scritto dagli ingegneri Linear "A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries" [42].

Il metodo Enanched Coulomb Counting permette di integrare assieme al calcolo dello SOC anche la stima dello SOH, che avviene periodicamente quando avviene una carica o una scarica completa.

Come per li classico Coulomb Counting abbiamo bisogno di conoscere $SOC(t_0), I_b$ e C_{rated} .

Introduciamo qui nuovi parametri:

- $C_{releasable}$: è la capacità rilasciabile dalla batteria da quel momento fino al suo completo scaricamento.
- C_{max} : è la capacità massima che la batteria può rilasciare da quando è completamente carica fino a completamente scarica. Questo valore solitamente è minore di C_{rated} .
- $C_{released}$: la capacità rilasciata dalla batteria dal quando era completamente carica, fino a quel momento.

Quindi possiamo scrivere:

$$SOC = \frac{C_{releasable}}{C_{rated}}, \quad SOH = \frac{C_{max}}{C_{rated}}, \quad DOD = \frac{C_{released}}{C_{rated}}$$

Dove SOC è la quantità di carica che è possibile scaricare;

SOH è lo State Of Health, cioè lo stato di degradazione della cella, misurato come la carica che è possibile scaricare dalla batteria da quando è completamente carica a completamente scarica;

DOD è il Depth Of Discharge, la carica che è stata rilasciata dalla batteria dal momento che era completamente carica.

Durante l'utilizzo della cella, tenendo traccia del tempo e della corrente I_b , possiamo calcolare quanta carica è stata rilasciata dalla batteria nell'intervallo di tempo τ :

$$\Delta DOD = \frac{-\int_{t_0}^{t_0+\tau} I_b(t) \, dt}{C_{rated}}$$

Con I_b positivo in carica e negativo in scarica. Il *DOD* accumulato al tempo t è:

$$DOD(t) = DOD(t0) + \eta \Delta DOD$$

Dove $\eta \in \eta_d$ in scarica e η_c in carica, questo serve per tenere in considerazione delle inefficienze durante l'utilizzo della cella. L'efficenza in carica è definita come:

$$\eta_c = \frac{C_{discharge,ratemin}}{C_{charge,ratemax}}$$

Dove $C_{discharge,ratemin}$ e $C_{discharge,ratemin}$ sono trovate sperimentalmente e sono rispettivamente la capacità che la cella rilascia durante una scarica con un carico costante molto basso, e la capacità della cella acquisita durante una carica al rate più alto possibile. L'efficenza in scarica invece è definita come:

$$\eta_d = \frac{I_1 T_1 + I_2 T_2}{C_{max}}$$

La cella viene testata facendo una carica completa, ed una scarica divisa in due fasi: prima viene fatta passare una corrente specifica fino ad un valore desiderato di DOD, e successivamente viene fatta passare una corrente molto bassa fino ad arrivare alla tensione di cutoff V_{cutoff} .

 I_1T_1 e I_2T_2 sono la corrente e i periodi di scarica delle due rispettive fasi. Infine il valore dello *SOC* vine calcolato come:

$$SOC(t) = SOH(t) - DOD(t)$$

L'accuratezza di questo metodo dipende quindi dalla precisione con la quale è stimato il valore di SOH. Nel metodo proposto lo SOH è aggiornato ongi volta che la cella viene scaricata o ricaricata completamente, in Fig. 2.21 il diagramma di flusso che spiega in maniera più chiara l'algoritmo.



Figura 2.21: Flowchart dell'algoritmo Enanched Coulomb Counting [42]

2.4.4 SOC – Filtro di Kalman

Il filtro di Kalman è un efficiente filtro ricorsivo che valuta lo stato di un sistema dinamico a partire da una serie di misure soggette a rumore. Questo filtro viene spesso utilizzato come osservatore ottimo dello stato di un sistema dinamico, quindi può anche essere usato per stimare lo SOC di una cella.

Il filtro durante il suo funzionamento effettua due operazioni:

Prediction, o time update, durante il quale vengono proiettati in avanti all'istante successivo lo stato corrente e la covarianza dell'errore di stima al fine di ottenere una stima a priori per il successivo istante temporale.

Correction, o measurment Update, durante il quale viene realizzato il meccanismo di retroazione, cioè incorporando le nuove misure alla stima a priori calcolata all'istante precedente viene ottenuta una stima a posteriori migliorata. Senza entrare nei dettagli del funzionamento del filtro, prendiamo un sistema lineare tempo discreto del tipo Eq. (2.6), assumendo che dati siano nella forma di una distribuzione gaussiana.

$$\begin{cases} x(k) = Ax(k-1) + B_u u(k) + B_w w(k) \\ y(k) = Cx(k) + v(k) \end{cases}$$
(2.6)

 w_k è il rumore di processo (dovuto ad esempio a disturbi in ingresso), e v_k il rumore di misura (dovuto ad esempio a imperfezioni del sensore di misura). Come prima cosa il filtro di kalman si serve del modello del sistema per costruire una prima stima dello stato del sistema all'istante successivo k + 1. Il secondo passaggio dell'algoritmo consiste nel servirsi delle misure in uscita all'istante k + 1, che sarà diventato k, e di correggerne la stima.

Pesando il contributo della predizione e della correzione attraverso il Guadagno di Kalman, il filtro riesce a fornire una stima ottima dello stato che stiamo osservando, cioè la stima che minimizza l'errore quadratico medio di stima.

Il seguente approfondimento del Filtro di kalman è stata estrapolato dalle slides del professore Luigi Biagiotti per il corso di sistemi di controllo dell'università di modena [43]

Processi Stocastici

Come l'introduzione in [43], questo breve capitolo è necessario a rendere chiara la teoria dietro il filtro di kalman.

I rumori sulla misura e l'incertezza possono essere modellati come dei processi stocastici, cioè dei processi che non possono essere modellati deterministicamente, ma sono formati da un insieme di variabili aleatorie.

In particolare, una variabile aleatoria continua è una variabile che assume un valore casuale in un insieme continuo di valori ammissibili, e ciascun valore ammissibile è caratterizzato da una certa probabilità di essere assunto.

Formalmente, se X è una variabile aleatoria continua:

- X può assumere valori nell'intervallo continuo $[x_1, x_2]$.
- p(X = x), o p(x), è la funzione di densità di probabilità che la variante aleatoria X assuma il valore x.

Una variabile aleatoria continua è detta variabile gaussiana se la sua probabilità è una curva di gauss del tipo:Eq. (2.7), come in Fig. 2.22.

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$
(2.7)

La probabilità che una variabile aleatoria X assuma un valore compreso tra un



Figura 2.22: Distribuzione Gaussiana

intervallo (a, b) è:

$$Pr(x \in (a, b)) = \int_{a}^{b} p(x) dx.$$
 (2.8)

Definiamo il Valore atteso E[x] come una generalizzazione del valore medio, ma in un fenomeno aleatorio:

$$E[x] = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x) \, dx. \tag{2.9}$$

Definiamo anche la Varianza di un segnale attorno al suo valore atteso, che rappresenta quanto la variabile aleatoria si disperde attorno al suo valore atteso:

$$\sigma^2 = E[(X - E[X])^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - E[X])^2 \, dx.$$
 (2.10)

IPOTESI

Facciamo alcune ipotesi per semplificare il problema, come in [43]:

- Entrambe w e v sono assunte siano processi stocastici Gaussiani, stazionari, bianchi e a media nulla, per i quali però ne conosciamo le martici di covarianza.
- $w(k) \in v(k)$ sono variabili casuali a distribuzione gaussiana per ogni istante di tempo, quindi:

$$\begin{split} E[w(k)] &= 0, & \forall k & E[v(k)] = 0, & \forall k \\ E[w(k)w^{T}(k)] &= W(k), & \forall k & E[v(k)v^{T}(k)] = V(k), & \forall k \\ E[w(k_{1})w^{T}(k_{2})] &= 0, & \forall k_{1} \neq k_{2} \\ & (2.11) & (2.11) \end{split}$$

• I rumori di processo e di misura sono tra loro indipendenti, cioè:

$$E[w(k_1)v^T(k_2)] = 0, \,\forall k_1, k_2$$
(2.12)

• Si assume che siano note la media e la covarianza dello stato iniziale:

$$E[x_0] = \overline{x}_0 E[(x_0 - \overline{x}_0)(x_0 - \overline{x}_0)^T] = P_0$$
(2.13)

• Inoltre si assume che i processi stocastici $w(k) \in v(k)$ siano incorrelati con il vettore aleatorio x_0

TEOREMA (FILTRO DI KALMAN)

A questo punto possiamo scrivere il teorema di kalman [43]: Se le coppie (A, B_w) e (A, C) del sistema in Eq. (2.6) sono rispettivamente controllabile ed osservabile, allora l'osservatore:

$$\hat{x}(k+1) = A(k)\hat{k} + B(k)u(k) + L(k)(y(k) - C(k)\hat{x}(k))$$
(2.14)

È stabile ed ottimo, cioè minimizza l'errore quadratico medio di stima:

$$E[e^{T}(k)e(k)]$$
 (2.15) $con: e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ (2.15)

Se il guadagno viene scelto come

$$L(k) = A(k)P(k)C^{T}(k)[C(k)P(k)C^{T}(k) + V(k)]^{-1}$$
(2.16)

Dove P(k) è la soluzione dell'equazione di Ricciati [44]:

$$P(k+1) = -A(k)P(k)C^{T}(k)[V(k) + C(k)P(k)C^{T}(k)]^{-1}C(k)P(k)A^{T}(k) + A(k)P(k)A^{T}(k) + B_{w}(k)W(k)B_{w}^{T}(k)$$
(2.17)

 $\operatorname{Con} P(k_0) = P_0$

In questo modo la stima fornita dall'osservatore ottimo è non polarizzata, cioè il calore medio dell'errore di stima è nullo):

$$E[e(k)] = 0 (2.18)$$

La matrice di covarianza dell'errore coincide con P(k):

$$E[e(k)e^{T}(k)] = P(k)$$
 (2.19)

Ed il valore quadratico medio di stima è dato da:

$$E[e^{T}(k)e(k)] = tr[P(k)]$$

$$(2.20)$$

APPLICAZIONE DEL TEOREMA

L'applicazione pratica del teorema, come descritto in [43], può essere fatta prendendo in considerazione un sistema del tipo:

$$\begin{cases} x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_k \\ y_k = Cx_k + v_k \end{cases}$$
(2.21)

Le variabili $w_k \in v_k$ rappresentano rispettivamente il rumore di processo e di osservazione, valor medio nullo $\bar{w}_k = \bar{v}_k = 0$ e varianza rispettiva Q ed R conosciute (si suppone rumore gaussiano bianco) [45]

Si definisce \hat{x}_k^- lo stato a priori stimato all'istante k calcolato sulla base della conoscenza del processo anteriore dall'istante k, e \hat{x}_k stima dello stato a posteriori all'istante k, data la misura y_k allo stesso istante.

Si definiscono poi gli errori di stima a priori e a posteriori (Eq. (2.22)), con le rispettive covarianze (Eq. (2.22)) come:

L'algoritmo si divide quindi in due fasi:

Predizione: le equazioni proiettano lo stato e la covarianza dell'errore di stima in avanti dall'istante temporale k-1 a k.

$$\hat{x}_{k}^{-} = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k}
P_{k}^{-} = AP_{k-1}A^{T} + Q$$
(2.23)

Aggiornamento: prima viene calcolata la matrice dei guadagni di kalman L_k , quindi le misure y_k sono usate per generare una stima dello stato a posteriori. Infine, viene calcolata una stima a posteriori della covarianza dell'errore P_k .

$$L_{k}^{-} = P_{k}^{-}C^{T}(CP_{k}^{-}C^{T} + R_{k})^{-1}$$

$$\hat{x}_{k} = \hat{x}_{k}^{-} + L_{k}(y_{k} - C\hat{x}_{k}^{-})$$

$$P_{k} = (I - L_{k}C)P_{k}^{-}$$
(2.24)

Dopo ciascuna coppia predizione-correzione, il processo è ripetuto con la precedente stima a posteriori usata per proiettare o predirre la nuova stima a priori. La vera forza del filtro di kalman è quella di essere in grado scegliere autonomamente se dare un peso maggiore alla misura o alla predizione, il processo avviene in questo modo: La differenza $(y_k - C\hat{x}_k)$ è chiamata innovazione, o residuo. Il residuo riflette la differenza tra la misura predetta e quella reale.

Se la covarianza delle misure tende a zero, il guadagno di kalman pesa il suo residuo maggiormente, dando più peso alla misura del sensore.

$$\lim_{R_k \to 0} L_k = C^T (CC^T)^{-1} = C^+$$
(2.25)

Quando la stima a priori della covarianza tende a zero, anche il guadagno di kalman tende a zero, in questo modo l'influenza del residuo diminuisce ed il filtro farà affidamento solo alla predizione.

$$\lim_{P_k^- \to 0} L_k = 0 \tag{2.26}$$

2.4.5 SOC – Unscented Kalman Filter

Una limitazione del filtro di kalman è quella di poter essere utilizzato solamente nei sistemi lineari, ma come possiamo vedere dalle equaizoni di stato del nostro modello (Eq. (2.27)), questo non è lineare e l'utilizzo del filtro non sarebbe possibile.

Una soluzine al problema è quella di utilizzare un'estensione del filtro ai sistemi non lineari, uno di questi è l'Extended Kalman Filter – EKF.

Questo filtro approssima la funzione non lineare in una lineare attorno alla media



Figura 2.23: Approssimazione della gaussiana con EKF attorno alla media [46]

della gaussiana, per poi predirne il valore.

Il problema dell'EKF è quello di approssimare la gaussiana in un solo punto, infatti ci potrebbero essere dei casi per i quali questo non è sufficiente per ottenere un'approssimazione della gaussiana efficace. (Fig. 2.23)

Per ovviare a questo problema, è possibile utilizzare più punti oltre alla media per approssimare la gaussiana, in questo modo staremo utilizzando l'Unscented Kalman Filter – UKF [46]. (Fig. 2.24)

L'UKF introduce il concetto di sigma points: prendiamo alcuni punti dalla gaussiana di riferimento e li mappiamo nella gaussiana "obbiettivo" dopo aver fatto passare questi punti per una funzione non lineare, dopo di che possiamo calcolare la nuova media e varianza della gaussiana trasformata. Potrebbe essere molto difficile trasformare tutta la distribuzione attraverso una funzione non lineare, ma con i sigma points risulta tutto più efficiente.

Per una buona approssimazione abbiamo anche bisogno di pesare i sigma points. I passi da seguire prima di applicare l'Unscented Kalman Filter quindi sono:

- 1. Calcolare un set di sigma points
- 2. Assegnare dei pesi a ciascun Sigma point
- 3. Trasformare i punti attraverso la funzione non lineare
- 4. calcolare la gaussiana dai punti pesati e trasformati
- 5. calcolare la media e la varianza della nuova gaussiana



Figura 2.24: Approssimazione della gaussiana con UKF attorno alla media [46]

Equazioni di stato della batteria

Per poter utilizzare il filtro di kalman per il calcolo dello *SOC*, dobbiamo trovare il sistema che descrive il modello circuitale di una batteria: dalla Fig. 2.11 possiamo ottenere le seguenti equazioni

$$\dot{U}_{1} = -\frac{1}{R_{1}C_{1}} + \frac{I_{b}}{C_{1}} + w_{1}
\dot{U}_{2} = -\frac{1}{R_{2}C_{2}} + \frac{I_{b}}{C_{2}} + w_{2}
SOC = \frac{I_{b}}{C_{rated}} + w_{3}$$
(2.27)

L'uscita del sitema è:

$$U_t = U_{oc} - U_1 - U_2 - I_b R_0 + v (2.28)$$

Quindi portando tutto nel tempo discreto, otteniamo le equazioni di stato in tempo discreto:

$$\begin{cases} X_{k+1} = \begin{bmatrix} e^{(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1})} & 0 & 0\\ 0 & e^{(-\frac{\Delta t}{R_2 C_2})} & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot X_k + \begin{bmatrix} R_1(1 - e^{(\frac{\Delta t}{R_1 C_1})})\\ R_1(1 - e^{(\frac{\Delta t}{R_2 C_2})})\\ -\frac{\Delta t}{C_{rated}} \end{bmatrix} \cdot I_b + w_k \tag{2.29}$$

 $X_k = [U_{1,k}; U_{2,k}; SOC_k]^T$ sono le variabili di stato del sistema.

L'equazione della misurazione della tensione U_t ai capi della cella rimane la stessa:

$$U_{t,k} = U_{oc} - U_1 - U_2 - I_b R_0 + v_k (2.30)$$

Dove w_k è il rumore del processo, e v_k il rumore della misura.

Per poter implementare in maniera efficace il filtro di kalman abbiamo bisogno dei parametri R_0, R_1, R_2, C_1, C_2 , ma questi non sono facili da acquisire, soprattutto se consideriamo quanto commentato in Sezione 2.3.3 per la quale le tecniche per farlo impiegano molto tempo: infatti la debolezza del filtro di Kalman sta proprio nella necessità di conoscere in maniera abbastanza precisa le equazioni ed i parametri che governano il sistema.

In un pacco batterie composto da molte celle risulta essere difficile ricavare i parametri di tutte le celle (o almeno tutti i paralleli), quindi potrebbe essere utile ricavare i parametri di una di queste e prenderli come buoni per tutte le altre.

Ovviamente una soluzione del genere si scontra con la grande eterogeneità delle celle (anche se dello stesso modello e provenienti dallo stesso stock) dovuta alle varie tolleranze durante la produzione.

Potrebbe essere quindi necessario cambiare approccio e trovare un modo per effettuare una stima dei parametri in maniera on-line.

Una prima tecnica per calcolare i parametri on-line si basa sull'utilizzo dell'EKF [47]. Con questo algoritmo lo SOC viene calcolato con l'UKF, e l'EKF si occupa della stima dei parametri della cella (questi verranno successivamente utilizzati per la computazione dell'UKF [47]).

Un'altro metodo per effettuare l'estrazione dei parametri è quello di utilizzare il recursive least square algorithm (RLS) [51].

2.4.6 Estrazione dei parametri con recursive least square algorithm (RLS)

Il recursive least square algorithm (RLS) è un algoritmo ricorsivo largamente utilizzato per effettuare la stima on-line dei parametri di un sistema [48]. Si basa sull'algoritmo least square (LS), questo è uno dei metodi maggiormente utilizzati per disegnare la curva di best fit di un dataset ulilizzando una regressione lineare come in Fig. 2.25

Per raggiungere la curva di best fit di un sistema, l'algoritmo LS minimizza la somma dei quadrati degli errori tra ogni dato e la curva che viene a formarsi.

Questo algoritmo può essere anche utilizzato, come già detto, per stimare i parametri di un sistema lineare, per questo motivo potrebbe essere utilizzato come stimatore dei parametri delle nostre celle.

Per comprendere meglio come l'algoritmo RLS opera, analizziamo i passaggi matematici per tale stima a partire da un semplice sistema lineare nel tempo.

La seguente spiegazione è stata basata sulle slides del professore Thomas F. Edgar dell'università del Texsas [50], che ne riporta in modo chiaro i vari passaggi matematici.



Figura 2.25: Fitting di un dataset con una funzione quadratica utilizzando l'algoritmo LS [49]

Esempio con un solo parametro

Prendiamo in esempio un'equazione scalare, come descritto in [50], quindi guardiamo il modello matematico di una certa misura y:

$$y = ax \tag{2.31}$$

Nella realtà, lo strumento di misura riporta la stima di ciò che stiamo misurando sempre con un certo errore (dovuto ai rumori, incertezza ecc.)

$$y^* = ax + \epsilon \tag{2.32}$$

Con ϵ l'errore di musura, e y^* la misura acquisita.

Conoscendo l'ingresso x, e l'uscita della misura y^* , possiamo ricavare una stima del parametro a minimizzando la somma dei quadrati degli errori della misura. Se \hat{a} è la stima di a, e k è il numero delle misure che ho effettuato, allora:

$$\hat{a} = \min_{a} \sum_{i=1}^{k} (\hat{a}x_i - y_i^*)^2$$
(2.33)

Troviamo il valore di \hat{a} che minimizza la sommatoria come lo zero della derivata prima rispetto ad a:

$$\min_{a} \sum_{i=1}^{k} (\hat{a}x_i - y_i^*)^2 \to \frac{\partial}{\partial \hat{a}} \sum_{i=1}^{k} (\hat{a}x_i - y_i^*)^2$$
(2.34)

Procedendo con i calcoli:

$$\frac{\partial}{\partial \hat{a}} \sum_{i=1}^{k} (\hat{a}x_i - y_i^*)^2 = 2 \cdot \sum_{i=1}^{k} (\hat{a}x_i - y_i^*) \frac{\partial}{\partial \hat{a}} \sum_{i=1}^{k} (\hat{a}x_i - y_i^*) = 2 \cdot \sum_{i=1}^{k} (\hat{a}x_i - y_i^*) \cdot x_i = 0 \quad (2.35)$$

$$\sum_{i=1}^{k} (\hat{a}x_i - y_i^*) \cdot x_i = \sum_{i=1}^{k} \hat{a}x_i^2 - x_i y_i^* = 0$$
(2.36)

$$\hat{a} \cdot \sum_{i=1}^{k} x_i^2 = \sum_{i=1}^{k} x_i y_i^* \tag{2.37}$$

$$\hat{a} = \left(\sum_{i=1}^{k} x_i^2\right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{k} x_i y_i^*$$
(2.38)

Per semplificare:

$$\hat{a} = p_k \cdot b_k \tag{2.39}$$

La Eq. (2.38) è la soluzione analitica del minimo, questa è la forma non ricorsiva, quindi adatta quando abbiamo un preset finito di misure. In un ambiente real time avremo bisogno di una soluzione ricorsiva al problema.

Forma ricorsiva

Partendo dalla soluzione Eq. (2.39), l'aggiornamento di $p_k^{-1} e b_k$ basati su i nuovi dati acquisiti all'istante k di (y_i, x_i) possono essere scritto come:

$$p_k^{-1} = \sum_{i=1}^k x_i^2 = p_{k-1}^{-1} + x_k^2$$
(2.40)

$$b_k = \sum_{i=1}^k x_i y_i^* = b_{k-1} + x_k y_k^*$$
(2.41)

Quindi \hat{a} ed p_k ver
ranno aggiornati rispettivamente da Eq. (2.42) e Eq. (2.43)

$$\hat{a}_k = \hat{a}_{k-1} - K_k \underbrace{\left(x_k \hat{a}_{k-1} - y_k^* \right)}_{\text{estimation error}}$$
(2.42)

$$p_k = p_{k-1} - p_{k-1}^2 x_k (1 + p_{k-1} x_k^2)^{-1}$$
(2.43)

Dove K è:

$$K_k = p_{k-1} x_k (1 + p_{k-1} x_k^2)^{-1}$$
(2.44)

Esempio con più parametri

Se il nostro sistema è composto da più parametri,vedi per esempio descritto in [50] come:

$$y = \underline{x}^T \underline{a} = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \tag{2.45}$$

Cercheremo il valore di $\underline{\hat{a}}$ che minimizza gli errori

$$\underline{\hat{a}} = \min_{\underline{a}} \sum_{i=1}^{k} (\underline{x}_i^T \underline{\hat{a}} x_i - y_i^*)^2$$
(2.46)

Allora possiamo riscrivere l'Eq. (2.42) e Eq. (2.43) come :

$$\underline{\hat{a}}_{k} = \underline{\hat{a}}_{k-1} - K_{k} \underbrace{(\underline{x}_{k}^{T} \underline{\hat{a}}_{k-1} - y_{k}^{*})}_{\text{estimation error}}$$
(2.47)

$$\underline{P}_{k} = \underline{P}_{k-1} - \underline{P}_{k-1} \underline{x}_{k} (1 + \underline{x}_{k}^{T} \underline{P}_{k-1} \underline{x}_{k})^{-1} \underline{x}_{k}^{T} \underline{P}_{k-1}$$
(2.48)

Con

$$K_k = \underline{P}_k - 1\underline{x}_k (1 + \underline{x}_k^T \underline{P}_{k-1} \underline{x}_k)^{-1}$$
(2.49)



Figura 2.26: Modello 2RC di una batteria Li-ion [51]

2.4.7 RLS per stimare i parametri di una cella Li-ion

Per applicare questo algoritmo ai nostri scopi, torniamo al modello 2RC in Fig. 2.26 che abbiamo già analizzato in precedenza.

Le equazioni del modello 2RC già ottenuse in Eq. (2.27) saranno del tipo:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu\\ y = Cx \end{cases}$$
(2.50)

Con:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0\\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ \frac{1}{C_2} \\ \frac{1}{C_{rated}} \end{bmatrix}$$
(2.51)

 $C = \left[\begin{array}{c} R_0 , \quad U_{oc} - U_1 - U_2 \end{array} \right]$

Qui verranno osservati i passaggi che sono stati compiuti nell'articolo Forgetting Factor Recursive Least Square Algorithm for Online Identification of Equivalent Circuit Model Parameters of a Lithium-Ion Battery [51], che mostra come è possibile identificare i parametri di una cella Li-ion in maniera online tramite l'algoritmo RLS.

Questo approccio al problema è stato studiato anche in diversi altri articoli [52] [53] [54] [55], ma è stato scelto quello sopra citato [51] essendo il più chiaro e semplice da implementare.

Algoritmo

L'obiettivo è quello di scrivere una funzione ricorsiva del tipo $\underline{y} = \underline{x}^T \underline{a}$, in questo modo possiamo stimare i parametri del vettore \underline{a} come in Sezione 2.4.6.

Innanzitutto, passando nel dominio della frequenza possiamo scrivere la differenza

di potenziale tra U_L ed U_{OC} come:

$$E = U_L(s) - U_{OC}(s) = -I(S) \left(R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 s} + \frac{R_2}{1 + R_2 C_2 s} \right)$$
(2.52)

Dove E è la somma delle tensioni ai capi di R_0, R_1 ed R_2 . Considerando E(S) e I(S) rispettivamente l'imput e l'output di un nuovo sistema, allora possiamo scrivere la funzione di trasferimento G(S):

$$G(S) = \frac{E(S)}{I(S)} = -\frac{R_0 s^2 + \frac{R_0 R_1 C_1 + R_0 R_2 C_2 + R_2 R_1 C_1 + R_1 R_2 C_2}{R_1 C_1 R_2 C_2} s + \frac{R_0 + R_1 + R_2}{R_1 C_1 R_2 C_2}}{s^2 + \frac{R_1 C_1 + R_2 C_2}{R_1 C_1 R_2 C_2} s + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2}}$$
(2.53)

Passiamo nel dominio del tempo applicando la trasformazione bilineare $S = \frac{2}{T} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$, dove T è il periodo ed otteniamo

$$G(z^{-1}) = \frac{E(k)}{I(k)} = \frac{\theta_3 + \theta_4 z^{-1} + \theta_5 z^{-2}}{1 - \theta_1 z^{-1} - \theta_2 z^{-2}}$$
(2.54)

Con:

$$\begin{cases} \theta_{1} = \frac{2T^{2} - 8R_{1}C_{1}R_{2}C_{2}}{-T^{2} - 2T(R_{1}C_{1} + R_{2}C_{2}) - 4R_{1}C_{1}R_{2}C_{2}} \\ \theta_{2} = \frac{T^{2} - 2T(R_{1}C_{1} + R_{2}C_{2}) + 4R_{1}C_{1}R_{2}C_{2}}{-T^{2} - 2T(R_{1}C_{1} + R_{2}C_{2}) - 4R_{1}C_{1}R_{2}C_{2}} \\ \theta_{3} = \frac{T^{2}(R_{0} + R_{1} + R_{2}) + 2T(R_{0}R_{1}C_{1} + R_{0}R_{2}C_{2} + R_{1}R_{2}C_{2} + R_{2}R_{1}C_{1}) + 4R_{0}R_{1}C_{1}R_{2}C_{2}}{-T^{2} - 2T(R_{1}C_{1} + R_{2}C_{2}) - 4R_{1}C_{1}R_{2}C_{2}} \\ \theta_{4} = \frac{2T^{2}(R_{0} + R_{1} + R_{2}) - 8R_{0}R_{1}C_{1}R_{2}C_{2}}{-T^{2} - 2T(R_{1}C_{1} + R_{2}C_{2}) - 4R_{1}C_{1}R_{2}C_{2}} \\ \theta_{5} = \frac{T^{2}(R_{0} + R_{1} + R_{2}) - 2T(R_{0}R_{1}C_{1} + R_{0}R_{2}C_{2} + R_{1}R_{2}C_{2} + R_{2}R_{1}C_{1}) + 4R_{0}R_{1}C_{1}R_{2}C_{2}}{-T^{2} - 2T(R_{1}C_{1} + R_{2}C_{2}) - 4R_{1}C_{1}R_{2}C_{2}} \end{cases}$$

$$(2.55)$$

Dall'Eq. (2.54) otteniamo l'equazione ricorsiva:

$$E(k) = \varphi(k)^{\mathsf{T}} \cdot \theta(k) = \begin{bmatrix} E(k-1) \\ E(k-2) \\ I(k) \\ I(k-1) \\ I(k-2) \end{bmatrix}^{\mathsf{T}} \begin{bmatrix} \theta_1(k) \\ \theta_2(k) \\ \theta_3(k) \\ \theta_4(k) \\ \theta_5(k) \end{bmatrix}$$
(2.56)

Abbiamo così l'equazione del tipo $\underline{y} = \underline{x}^T \underline{a}$ desiderata, conoscendo i valori di I ed E possiamo calcolare quelli di $\theta(k)$.

I è il valore della corrente che passa all'interno della cella I_b che può essere ricavata con un sensore di corrente.

La difficoltà di implementazione dell'algoritmo sta nel trovare il valore di $E(k) = U_L(k) - U_{OC}(k)$, infatti la tensione ai capi della cella U_L è facilmente ottenibile un ADC, mentre U_{OC} può essere solo stimata a partire dallo SOC.

Lo SOC può essere stimato con l'algoritmo culoumb counting, oppure come nella pubblicazione "SOC Estimation of Lithium Battery Based on Dual Adaptive Extended Kalman Filter [52]": qui la stima viene effettuata da un filtro di kalman, quest'ultimo ottiene i valori dei parametri della cella direttamente dall'algoritmo RLS.

 $\theta(k)$ non è il vettore dei parametri $[R_0, R_1, R_2, C_0, C_2]$, per arrivarci dobbiamo fare altri passaggi. Supponendo che a, b, c, d, f siano definiti come:

$$\begin{cases}
a = R_{0} \\
b = R_{1}C_{1}R_{2}C_{2} \\
c = R_{1}C_{1} + R_{2}C_{2} \\
d = R_{0} + R_{1} + R_{2} \\
f = R_{0}R_{1}C_{1} + R_{0}R_{2}C_{2} + R_{1}R_{2}C_{2} + R_{2}R_{1}C_{1}
\end{cases}$$
(2.57)

Allora possiamo scrivere i parametri θ_i come:

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{8b-2T^2}{4b+2cT+T^2} \\ \theta_2 = \frac{4cT}{4b+2cT+T^2} - 1 \\ \theta_3 = -\frac{4ab+2fT+dT^2}{4b+2cT+T^2} \\ \theta_4 = \frac{8ab-2dT^2}{4b+2cT+T^2} \\ \theta_5 = -\frac{4ab-2fT+dT^2}{4b+2cT+T^2} \end{cases}$$
(2.58)

Di nuovo, riscriviamo a,b,c,d,f:

$$\begin{cases}
 a = \frac{\theta_4 - \theta_3 - \theta_5}{1 + \theta_1 - \theta_2} \\
 b = \frac{T^2 (1 + \theta_1 - \theta_2)}{4(1 - \theta_1 - \theta_2)} \\
 c = \frac{T(1 + \theta_2)}{1 - \theta_1 - \theta_2} \\
 d = \frac{-\theta_3 - \theta_4 - \theta_5}{1 - \theta_1 - \theta_2} \\
 f = \frac{T(\theta_5 - \theta_3)}{1 - \theta_1 - \theta_2}
\end{cases}$$
(2.59)

Infine, possiamo ricavare il valore di R_0, R_1, R_2, C_1, C_2 a partire da a, b, c, d, f, quindi conoscendo i θ_i . Supponendo $\tau_1 = \frac{c + \sqrt{c^2 - 4b}}{2}$ e $\tau_2 = \frac{c - \sqrt{c^2 - 4b}}{2}$, scriviamo:

$$\begin{cases}
R_0 = a \\
R_1 = [\tau_1(d-a) + ac - f]/(\tau_1 - \tau_2) \\
R_2 = d - a - R_1 \\
C_1 = \tau_1/R_1 \\
C_2 = \tau_2/R_2
\end{cases}$$
(2.60)

Arrivati a questo punto, abbiamo bisogno solo di conoscere i parametri θ_i per poter ricavare i vari parametri, per questo scopo useremo l'algoritmo RLS.

Con le nostre misurazioni non riusciamo a ricavare il valore reale di E(k), quindi consideriamo l'errore del sistema e(k) e riscriviamo l'Eq. (2.56)

$$\widehat{E} = \varphi^{\mathsf{T}} \cdot \theta + e \tag{2.61}$$

Dove $e = [e(k)e(k-1)\cdots e(k-m)]^T$ è il vettore dell'errore sistematico, ed $\widehat{E} = [\widehat{E}(k)\widehat{E}(k-1)\cdots \widehat{E}(k-m)]^T$ è il vettore dell'output sottoposto ad errore. Il vettore θ è lo stesso

$$\theta = [\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4 \theta_5]^T \tag{2.62}$$

La matrice delle osservazioni $\varphi(k)$ diventa:

$$\varphi = \begin{bmatrix} \widehat{E}(k-1) & \widehat{E}(k-2) & I(k) & I(k-1) & I(k-2) \\ \widehat{E}(k-2) & \widehat{E}(k-3) & I(k-1) & I(k-2) & I(k-2) \\ & \vdots & & \\ \widehat{E}(k-m-1) & \widehat{E}(k-m-2) & I(k-m) & I(k-m-1) & I(k-m-2) \\ & & & \\ \end{bmatrix}$$
(2.63)

Vogliamo ora trovare la migliore stima di θ minimizzando (come prima) il quadrato degli errori.

L'errore può essere visto come un vettore, sapendo che il quadrato della lunghezza di un vettore può essere scritta come: $|| v^2 || = v'v = \sum_{i=0}^n v_i^2$ Allora il quadrato dell'errore è:

$$j = \sum_{t=0}^{m} [e(k-t)]^2 = e^T e$$
(2.64)

Come per l'algoritmo LS, troviamo il minimo di j ponendo la derivata = 0

$$\frac{\partial j}{\partial \theta}\Big|_{\theta=\theta'} = \frac{\partial j}{\partial \theta} \left[(\widehat{E} - \varphi \theta)^T (\widehat{E} - \varphi \theta) \right] = 0$$
(2.65)

$$\varphi^T \widehat{E} = \varphi^T \varphi \theta' \tag{2.66}$$

Se $\varphi^T \varphi$ è una matrice di rango massimo, allora possiamo scrivere il valore θ' che minimizza l'errore:

$$\theta' = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T \widehat{E}$$
(2.67)

Riprendendo l'Eq. (2.47) già ottenuta in precedenza, possiamo scrivere l'equazione che aggiorna il vettore θ :

$$\theta(k) = \theta(k-1) + k_0(k) [U_L(k) - U_{OC}(k) - \theta(k-1)^T \varphi(k)]$$
(2.68)

Dove K_0 è il guadagno:

$$K_0 = \frac{P_0(k-1)\varphi(k)}{\lambda + \varphi(k)^T P_0(k-1)\varphi(k)}$$
(2.69)

 λ è il forgetting factor: fa da peso per le nuove e vecchie misure ottenute. Se $\lambda = 1$ allora i dati acquisiti in precedenza avranno lo stesso peso rispetto a quelli nuovi (non "invecchiando").

Solitamente viene introdotto l'invecchiamento ponendo $\lambda = 0.98$, che è un valore comunemente considerato come un buon compromesso che si adatta bene agli scopi del filtro.

In alcuni casi il fattore λ viene modificato adattivamente [51] durante l'esecuzione dell'algoritmo, ma in questo report si è deciso di lasciarlo a 0.98 per semplicità.

Una volta calcolato $\theta(k)$ e K_0 , si provvede a fare l'update della matrice di covarianza:

$$P_0(k) = \frac{1}{\lambda} [I - K_0(k)\varphi(k)^T] P_0(k-1)$$
(2.70)

Dove I è la matrice identità. In questo modo, conoscendo il valore di $\theta(k)$, possiamo ottenere i valori di

 R_0, R_1, R_2, C_1, C_2 con l'Eq.(2.57).

2.5 RLS implementazione in Simulink

Matlab [56] è un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica creato dalla MathWorks: è molto celebre in ambito universitario/ingegneristico, questo è messo a disposizione gratuita degli studenti dell'Università Politecnica delle Marche, assieme all'altrettanto celebre Simulink: software strettamente legato a Matlab che viene utilizzato per la modellazione, simulazione ed analisi di sistemi dinamici.

In questa sezione si mostra nel dettaglio come è stata implementato l'algoritmo RLS appena descritto su ambiente Simulink utilizzando il modello messo a punto dal professore Massimo Conti dell'Università Politecnica delle Marche e dai suoi studenti coinvolti nel progetto.

In breve, questo modello è formato da una disposizione 1p6s di blocchi "Lithium Cell 2RC" che simulano ciascuno una cella Panasonic, modellata con la rappresentazione circutale 2RC, per le quali è possibile fare simulazioni di carica e scarica.

In questo ambiente è stato possibile compiere alcune simulazioni della carica delle celle, e di conseguenza della valutazione degli algoritmi di stima dello SOC, in particolare è stato possibile valutare la bontà dell'algoritmo RLS descritto nella sezione precedente.

Non si entrerà nel dettaglio del lavoro svolto nella costruzione del modello, l'interesse di questa sezione è quello di descrivere in modo chiaro i passaggi compiuti dall'algoritmo RLS.

Modello Simulink

In Fig. 2.27 modello Simulink nel quale sono state fatte le simulazioni, questo è composto da:

- 1. Cella 2RC.
- 2. Circuito di bilanciamento.
- 3. Gestione termica in arancione (tra celle e verso l'ambiente).
- 4. Switch selectore tra BMS o Current step.
- 5. Discharge step: imposta un valore di corrente di scarica o di carica.
- 6. BMSduino: contine gli algoritmi di carica e i parametri dele celle.
- 7. Time delay
- 8. Cells voltage: lettura delle tensioni delle celle

Tramite il selettore (4) possiamo scegliere se caricare il pacco attraverso l'algoritmo contenuto in BMSino o tramite un impulso costante, questo perchè il modello inizialmente è stato pensato per avere un benchmarck per diversi algoritmi di carica delle celle agli ioni di litio simulando un bms vero e proprio completo anche di bilanciamento (2) delle celle.



Figura 2.27: Modello Simulink



Figura 2.28: Discharge step block

Il nostro scopo è quello di verificare l'algoritmo RLS sopra discusso, quindi è stato utilizzato lo step di corrente (5) sia in carica che in scarica. Durante la prima parte della carica (o della scarica) il segnale può essere ritardato con un tempo a piacimento dal blocco Time dely (7), seguendo Eq. (2.71) :

$$uscita = \begin{cases} 0, & t < 60\\ ingresso, & t \ge 60 \end{cases}$$
(2.71)

Discharge step

Il blocco discharge step può essere utilizzato per scaricare o caricare il pacco utilizzando un valore di corrente rispettivamente negativo o positivo. Se si esplora il blocco Repeating Sequence Stair che è al suo interno possiamo anche impostare un vettore di output, in questo modo l'uscita del blocco diventa una serie di gradini dell'ampiezza impostata, e del periodo impostato in "sample time"

Blocco Lithium Cell 2RC

Nel modello Simulink sopra citato la rappresentazione circuitale di una batteria Li-ion 2RC è stata implementando dei blocchi Simscape [57]: un estensione di Simulink che permette di simulare modelli fisici, nel nostro caso un circuito elettrico. Con questo blocco (in Fig. 2.29) possiamo simulare oltre che la dinamica elettrica, anche quella termica (quindi quanto calore la cella irradia all'esterno e la temperatura della stessa), questo a vantaggio di avere una simulazione più accurata della cella.

I valori $[R_0, R_1, R_2, C_0, C_2]$ sono stati estratti sperimentalmente da una cella Panasonic NCR-18650B. I valori ricavati sono stati organizzati all'interno di una lookup table, per una caratterizzazione migliore della dinamica della cella che in questo modo diventa dipendente oltre che dalla corrente I_b , anche dalla temperatura T_b e dallo SOC.

Il generatore di tensione interno U_{oc} è stato implementato anche esso da una lookup



Figura 2.29: Blocco Lithium Cell 2RC in ambiente Simulink

table che dipende dalla temperatura e dallo SOC.

Lo SOC è calcolato a partire da un valore iniziale che possiamo impostare a piacere e dalla corrente I_b come:

$$SOC = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{rated}} \int_{t_0}^{t_0 + \tau} I_b \, dt.$$
 (2.72)

Blocco Kalman

Il blocco Kalman è stato creato per testare il calcolo dello SOC implementato con il filtro di kalman, aprendone uno (in Fig. 2.30 il blocco kalman_16, relativo alla prima cella) all'interno di questo troviamo:

- 1. Blocco RLS
- 2. Blocco kalman filter
- 3. Coulomb conuting
- 4. Capacity estimator

Dentro questo blocco sono testati due diversi algoritmi di calcolo dello SOC: il coulomb counting ed il filtro di kalman. Il blocco RLS sarà descritto più nel dettaglio in Sezione 2.5

Batterie elettrochimiche



Figura 2.30: Interno del blocco kalman_16



Figura 2.31: Blocco RLS in ambiente Simulink

Blocco RLS

Per il blocco RLS (Fig. 2.31) è stato utilizzato un blocco MATLAB Function, questo tipo di blocco è apprezzato per essere molto elastico: permette di scrivere del codice Matlab all'interno dell'ambiente Simulink ed interagire con gli altri blocchi del modello.

Parametri

MATLAB Function possiede un numero variabile di porte di entrata ed uscita, oltre che avere la possibilità di utilizzare i parametri presenti in workspace durante la simulazione.

Esplorando il blocco è possibile vedere con quali parametri questo interagisce, quelli utilizzate nel blocco RLS sono mostrate in Fig. 2.32

- [INPUT] I_: è la corrente che passa all'interno della cella, cioè I_b .
- OUTPUT Parameters : è un vettore che contiene i parametri estratti della batteria, $Parameters = [R_0, R_1, R_2, C_1, C_2].$
- [INPUT] SOC : il valore reale di SOC della cella.

Contents of: MODELLO_FINALE/Kalman_16/LRS (only)					MATLAB Function: LRS		
Column View: Stateflow	•	Show Details	10 object(s)	P	Name: LRS	-1	
Name I_ Parameters soc V T Current_time Em_LUT_1 Soc_LUT Soc_LUT solver_step	Scope Po Input 1 Output 1 Input 2 Input 3 Input 5 Parameter Parameter Parameter Parameter	rt Resolve Signal	DataType nherit: Same as Simulink nherit: Same as Simulink	Size -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1	Support variable-size arrays Saturate on integer overflow Allow direct feedthrough Treat these inherited Simulink signal types as fi obj MATLAB Function fimath Same as MATLAB Same as MATLAB Simular Content of the second seco	ects Fixed- fy Other	
Contents	Sei	arch Results		1	Revert Help	Apply	

2.5 – RLS implementazione in Simulink

Figura 2.32: Block esplorer del Blocco RLS con le variabili utilizzate

- [INPUT] V : tensione ai capi della cella.
- [INPUT] T : temperatura della cella.
- [INPUT] current_time : tempo trascorso dall'inizio della simulazione fino a quando il blocco viene utilizzato.
- [PARAMETER] Em_LUT_1 : valori della tensione a circuito aperto rispetto alla temperatura e lo SOC che formano una Lookup Table, questi valori sono stati trovati sperimentalmente e sono specifici della cella simulata. Fig. 2.33.
- [PARAMETER] Temperature_LUT : Valori in gradi kelvin che forniscono l'intervallo di temperatura utilizzati per conoscere in quale punto di Em_LUT_1 posizionarci.
- [PARAMETER] SOC_LUT : valori di SOC utilizzati per conoscere in quale punto di Em_LUT_1 posizionarci.
- [PARAMETER] solver_step : Il sample time del sistema, lo stesso utilizzato dal solver di Simulink

Temperature

$Em LUT 1 = [3.420 \ 3.420 \ 3.420$ 3.469 3.469 3.469 3.508 3.508 3.508 3.528 3.528 3.528 3.558 3.558 3.558 3.620 3.620 3.620 State of Charge 3.690 3.690 3.690 3.780 3.780 3.780 3.865 3.865 3.865 3.945 3.945 3.945 4.024 4.024 4.024 4.103 4.103 4.103 4.219 4.219 4.219 4.223 4.223 4.223 4.227 4.227 4.227 4.238 4.238 4.238];

Figura 2.33: Valori di em_lut_1, a cura degli studenti che hanno collaborato con il prof. Conti sul modello BMS Simulink.

Algoritmo & codice

Come per la Sezione 2.4.6, l'algoritmo che viene presentato si basa sull'articolo Adaptive Forgetting Factor Recursive Least Square Algorithm for Online Identification of Equivalent Circuit Model Parameters of a Lithium-Ion Battery [51]. In Fig. 2.34 è presentato il flowchart che è stato seguito per la stesura del codice.

Come già spiegato il blocco MATLAB function permette di scrivere del codice matlab all'interno di esso, il quale interagirà con il resto del modello simulink. La dichiarazione della funzione LRS mostra l'output **Parameter** (che come vedremo è un vettore contenente i parametri della cella), e i vari parametri che questa utilizza.

```
function Parameters = LRS(I_, soc, V, T, current_time, Em_LUT_1, ...
Temperature_LUT, SOC_LUT)
```



Figura 2.34: Flowcart dell'algoritmo RLS [51]

Seguendo la numerazione del flowchart in Fig. 2.34, possiamo dividere il codice in 7 sezioni.

1. Sono inizializzati per la prima volta i parametri per che sono necessari all'algoritmo.

L'unica differenza con il codice in Fig. 2.34 è che qui abbiamo inizializzato i parametri di $[R_0, R_1, R_2, C_0, C_2]$ con quelli reali (ovvero quelli che il modello usa per simulare la cella), ai quali la l'algoritmo dovrebbe convergere. Oltre a ciò è stato inizializzato anche il vettore $\theta(0)$, questo viene calcolato dall'Eq.(2.54) inserendo i parametri reali di $[R_0, R_1, R_2, C_0, C_2]$.

Questa modifica è stata apportata cercando di agevolare il codice nel convergere ai parametri giusti, fornendogli un valore iniziale con il quale iniziare.

$$\lambda = 0.98$$

$$[R_0, R_1, R_2, C_0, C_2] = [R_{0\,real}, R_{1\,real}, R_{2\,real}, C_{1\,real}, C_{2\,real}]$$

$$\theta(0) = \text{see Eq. (2.54)}$$

$$p_0(0) = eye(5) = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

$$E(k) = \theta(k-1)^{\mathsf{T}} \cdot [0,0, I_-,0,0]^{\mathsf{T}}$$

$$E(k-1) = 0$$

$$E(k-2) = 0$$

$$\theta(k) = \theta(0)$$

$$\theta(k-1) = \theta(0)$$

$$I(k) = I_-$$

$$I(k-1) = 0$$

$$I(k-2) = 0$$

$$(2.73)$$

```
%% 1 - initialization
T=solver.step;
persistent lambda E theta P0 I
if isempty(lambda)
lambda=0.98;
P0 = eye(5);
E = struct( 'k' ,0,...
'k.minus.1',0,...
'k.minus.2',0);
theta = struct( 'k' ,[0;0;0;0;0],...
'k.minus.1',[0;0;0;0;0]);
R0=0.065;
R1=0.018;
R2=0.021;
```

```
C1=2000;
C2=20000;
theta.k(1) = (2 * T^2 - 8 * R1 * C1 * R2 * C2) / ...
            (-T^2-2*T*(R1*C1+R2*C2)-4*R1*C1*R2*C2);
theta.k(2) = (T^2-2*T*(R1*C1+R2*C2)+4*R1*C1*R2*C2)/...
            (-T^2-2*T*(R1*C1+R2*C2)-4*R1*C1*R2*C2);
theta.k(3) = (T^2 * (R0 + R1 + R2) + 2 * T * (R0 * R1 * C1 + R0 * R2 * C2 + ...)
             R1*R2*C2+R2*R1*C1)+4*R0*R1*C1*R2*C2)/...
            (-T^2-2*T*(R1*C1+R2*C2)-4*R1*C1*R2*C2);
theta.k(4) = (2*T^2*(R0+R1+R2)-8*R0*R1*C1*R2*C2)/...
            (-T^2-2*T*(R1*C1+R2*C2)-4*R1*C1*R2*C2);
theta.k(5) = (T^2 * (R0+R1+R2) - 2*T* (R0*R1*C1+R0*R2*C2+...)
             R1*R2*C2+R2*R1*C1)+4*R0*R1*C1*R2*C2)/...
            (-T^2-2*T*(R1*C1+R2*C2)-4*R1*C1*R2*C2);
theta.k_minus_1=theta.k;
                 'k' , I_ ,...
'k_minus_1', 0 ,...
'k_minus_2', 0 );
                  'k'
Т
      = struct(
E.k = transpose(theta.k_minus_1)*[0;0;I_;0;0];
```

Se λ non è "empty", vuol dire che è già stata compiuta l'inizializzazione, quindi viene eseguito l'aggiornamento dei parametri

```
else
	I.k_minus_2 = I.k_minus_1;
	I.k_minus_1 = I.k;
	I.k = I_;
	E.k_minus_2 = E.k_minus_1;
	E.k_minus_1 = E.k;
	theta.k_minus_1 = theta.k;
end
```

2. Viene aggiornato con i nuovi valori di E ed I il vettore $\varphi = [E(k-1), E(k-2), I(k), I(k-1), I(k-2)]^{\mathsf{T}}$

```
%% 2 - data imput matrix
phi = [ E.k_minus_1 ;
            E.k_minus_2 ;
            I.k ;
            I.k_minus_1 ;
            I.k_minus_2 ];
```

3. Calcolo di K_0

```
%% 3 - calculate gain k0
K0 = (P0*phi)/(lambda+transpose(phi)*P0*phi);
```

4. Calcolo di E ed e

```
%% 4 - calculate output prediction and error
E.k = transpose(theta.k_minus_1)*phi;
ocv = CalcOCV(T,soc,Em_LUT_1, Temperature_LUT, SOC_LUT);
e = V - ocv - (transpose(theta.k_minus_1)*phi);
```

CalcOCV stima il valore di $U_{oc}(k)$ a partire dallo state of charge e dalla temperatura della cella, utilizzando una lookup table 2D (Fig. 2.33)

```
function OCV = CalcOCV(T,SOC,Em_LUT, Temperature_LUT, SOC_LUT)
% Perform the capacity table lookup
%choose the right lookup with the temperature
switch TemperatureRange(T,Temperature_LUT)
   case 1
       Em_LUT_=Em_LUT(:,1);
   case 2
      Em_LUT_=Em_LUT(:,2);
   case 3
       Em_LUT_=Em_LUT(:,3);
    otherwise
       Em_LUT_=Em_LUT(:,2);
end
%now we went from 2D lookup to 1D lookup
OCV = LookupTable1D (SOC_LUT, Em_LUT_, SOC);
end
```

```
function value = LookupTablelD (x,y,input)
if size(x) ≠ size(y)
    error('lut and breackpoints dimension are different')
end
if size(x,2) ≠ 1
    error('lut and breackpoints must be Nx1')
end
i=0;
%find the right interval
for c = 1:size(x,1)
    i=i+1;
    if input ≤ x(i)
        break
    end
end
```
```
uno = i;
due = i+1;
if i == 1
    uno = 1;
    due = 2;
end
if i == size(x,1)
    uno = i-1;
    due = i;
end
%find the value of the choosen input using the
%"Equation of a Line from 2 Points" and "y=mx+c"
value = (((y(uno)-y(due))/(x(uno)-x(due)))*(input-x(uno)))+y(uno);
end
```

5. Calcolo di $\theta(k)$

```
%% 5 - update estimation prameter theta(k)
theta.k = theta.k_minus_1 + (K0*e);
```

7. Calcolo di $P_0(k=1)$

```
%% 7 - update covariance matrix
P0 = P0*(eye(5)-K0*transpose(phi))/lambda;
```

6. Calcolo ed aggiornamento di $[R_0, R_1, R_2, C_1, C_2]$

```
%% 6 - calculate model parameters
a = (theta.k(4)-theta.k(3)-theta.k(5))/ (1+theta.k(1)-theta.k(2));
b = ((period^2)*(1+theta.k(1)-theta.k(2)))/ (4*(1-theta.k(1)-theta.k(2)));
c = (period*(1+theta.k(2)))/(1-theta.k(1)-theta.k(2));
d = (-theta.k(3)-theta.k(4)-theta.k(5))/ (1-theta.k(1)-theta.k(2));
f = period*(theta.k(5)-theta.k(3))/(1-theta.k(1)-theta.k(2));
tau1 = (c + sqrt(abs((c^2)-4*b)))/2;
tau2 = (c - sqrt(abs((c^2)-4*b)))/2;
R0 = a;
R1 = (tau1*(d-a)+a*c-f)/(tau1-tau2);
R2 = d - a - R1;
C1 = tau1/R1;
C2 = tau2/R2;
Parameters=[R0,R1,R2,C1,C2];
end
```

Per $\tau_1 \in \tau_2$ sono state calcolate rispettivamente come

$$\tau_1 = \frac{c + \sqrt{|c^2 - 4b|}}{2} \qquad (2.74) \qquad \qquad \tau_2 = \frac{c - \sqrt{|c^2 - 4b|}}{2} \qquad (2.74)$$

È stato aggiunto li valore assoluto perchè durante la run del modello Simulink venivano a crearsi delle eccezioni dovute alle radici quadrate con segno negativo.

Questo comportamento non è voluto, ed è segno di non correttezza dell'algoritmo, in dettaglio nella prossima sotto sezione verrà visto come i parametri non convergono ai loro valori reali

Risultati dell'algoritmo

All'attuale stato dell'arte l'algoritmo non sembra funzionare.

Nella prima simulazione fatta, la cella è stata caricata con un algoritmo CC/CV da un valore iniziale di SOC 43%, ad una corrente di 1.5 A, per un tempo di 600 secondi.

E stato introdotto volutamente un ritardo nei primi 60 secondi, perchè si è pensato di simulare il comportamento di un pacco reale, che prima di essere utilizzato in carica o in scarica accende le schede per effettuare i vari controlli preliminari. Solo dopo un certo tempo questo scambierà energia con l'esterno. Si pensi a quando il pacco deve essere caricato: prima viene collegato all caricatore, viene acceso per fare i vari controlli, e poi inizia a ricevere la corrente dal caricatore.

Da Fig. 2.42 a Fig. 2.46 sono stati raccolti i plot che mostrano il confronto di ciascun parametro calcolato (blu) con quello reale (giallo).

In Fig. 2.35 è mostrata l'intera uscita del blocco RLS, qui è possibile vedere che tutti i parametri in colori diversi, rispettivamente:

giallo	RO
blu	R1
rosso	R2
verde	C1
viola	C2

Tabella 2.2: Legenda colori in uscita dal blocco RLS

2.5 - RLS implementazione in Simulink



Figura 2.35: Uscita del blocco RLS in carica $1.5\,\mathrm{A}$



Figura 2.36: Confronto valore reale R0 con quello calcolato in RLS (carica $1.5\,\mathrm{A})$







Figura 2.38: Confronto valore reale R2 con quello calcolato in RLS (carica 1.5 A)

2.5 - RLS implementazione in Simulink



Figura 2.39: Confronto valore reale C1 con quello calcolato in RLS (carica 1.5 A)



Figura 2.40: Confronto valore reale C2 con quello calcolato in RLS (carica 1.5 A)

 $Batterie\ elettrochimiche$

Per la seconda simulazione è stata effettuata una scarica con corrente costante 1 A, sempre partendo da un valore di SOC 43% per un tempo di 600 secondi, senza il ritardo di 60 secondi.

Come per la precedente simulazione, in Appendice B i plot dei confronti tra i parametri calcolati dall'algoritmo RLS(blu) e quelli reali(gialli).

In Fig. 2.41 l'uscita del blocco RLS, che contiene tutti i parametri rispettivamente come in Tabella 2.2.



Figura 2.41: Uscita del blocco RLS in scarica 1 A

2.5 - RLS implementazione in Simulink



Figura 2.42: Confronto valore reale R0 con quello calcolato in RLS (scarica 1 A)



Figura 2.43: Confronto valore reale R1 con quello calcolato in RLS (scarica 1 A)



Figura 2.44: Confronto valore reale R2 con quello calcolato in RLS (scarica 1 A)



Figura 2.45: Confronto valore reale C1 con quello calcolato in RLS (scarica 1 A)

2.5 - RLS implementazione in Simulink



Figura 2.46: Confronto valore reale C2 con quello calcolato in RLS (scarica 1 A)

Alcuni commenti sui risultati ottenuti:

- Sia in carica, che in scarica, i parametri in uscita sono evidentemente inadatti: oltre che essere fortemente rumorosi, questi presentano dei valori completamente diversi da quelli reali.
- Attorno al tempo di 60.7 secondi l'outptut del blocco rls durante la scarica si interrompe.
- I valori di $\tau_1 \in \tau_2$ dovrebbero essere numeri reali, invece si è dovuto modificare il calcolo di questi come già visto in Eq. (2.74) per fare in modo che risultino tali.

Capitolo 3

Peacock EV – Hardware

Il progetto di una vettura elettrica del polimarche racing team è nata già nel'anno accademico 2017/2018, in quegli anni nel reparto R&D sono stati fatti diversi studi a proposito della fattibilità del "progetto EV". Successivamente nell'anno accademico 2018/2019 il reparto R&D ha subito un cambiamento ed è diventato il reparto EV, in questo modo sono stati stanziati maggiori risorse e persone nel reparto, aggiungendo di fatto il progetto del veicolo elettrico nella timeline della squadra.

Durante il primo anno il reparto EV si è concentrato sul design del pacco batteria, con una particolare attenzione per la parte elettrica. Quell'anno sono state dimensionate le parti fondamentali del powertrain elettrico, servite come base di partenza per l'anno successivo, durante il quale sono state progettate le varie schede di sicurezza ed i render 3D del pacco.



Figura 3.1: Render Veicolo FSAE EV

3.0.1 Restrizioni regolamento

Ogni scelta di design deve essere conforme alle restrizioni del regolamento FSAE, nel nostro caso si farà riferimento al regolamento della competizione tedesca Formula Student Germany (FS Rules 2020[4]). Questo regolamento è tra i più utilizzati in Europa, ed anche uno dei più restrittivi. Si è scelto di seguire questo per essere sicuri che le scelte sarebbero state accettate in qualsiasi competizione alla quale il team si sarebbe iscritto (sempre nei confini europei).

Definizioni

EV1.1.1	Tractive System (TS) – Qualsiasi parte elettricamente connessa al motore e all'accumulatore.
EV1.2.1	Galvanic Isolation – Due circuiti sono elettricamente isolati, se sono vere entrambe le definizioni:
	• la resistenza di entrambi i circuiti è $\geq 500 \Omega/V$ in relazione alla massima tensione del TS, o 250 V, se la tensione del TS è $\leq 250 V$
	• la tensione di resistenza tra due circuiti deve essere maggiore di 3 volte quella della massima tensione del TS, o 750 V, se la

EV5.1.1 Cell – a battery cell or super-capacitor.

tensione del TS è $\leq 250 \,\mathrm{V}$

- EV5.1.2 Cell Energy the maximum cell voltage times the nominal capacity of the used cell.
- **EV5.1.3 TS Accumulator** all cells that store the electrical energy to be used by the TS as a whole.
- EV5.1.4 TS Accumulator Container the container itself, which contains the TS accumulator.

T11.1.1	The Low Voltage System (LVS) is defined as:
	\bullet every electrical part that is not part of the TS, see EV1.1.1
T11.1.2	The maximum permitted voltage that may occur between any two electrical connections in the LVS is 60 VDC or 25 VACRMS.
T11.1.4	The LVS must not use orange wiring or conduit.
T11.1.5	The LVS must be grounded to the chassis.

3.1 Pacco batteria – dimensionamento dell'accumulatore

Una delle fasi più importanti durante l'ingegnerizzazione di un BEV è quella del dimensionamento dell'accumulatore, questo deve essere abbastanza capiente da permettere di contenere l'energia per completare un percorso endurance nella competizione FSAE.

Regolamento

Per dimensionare il pacco siamo tenuti a rimanere nel range di tensione e di corrente imposto dal regolamento:

- EV4.1.1 The maximum permitted voltage that may occur between any two electrical connections is **600 VDC** and for motor controller/inverters internal low power control signals 630 VDC.
- $\label{eq:EV2.2.1} \begin{array}{c} \mbox{The TS power at the outlet of the TS accumulator container must} \\ \mbox{not exceed $80 \, kW}. \end{array}$

EV5.3.1	All cells which store the TS energy must be enclosed in (an) accumulator container(s).
EV5.3.2	Each TS accumulator segment must not exceed a maximum static voltage of 120 VDC , a maximum energy of 6 MJ , see EV5.1.2, and a maximum mass of 12 kg .

Quindi per l'accumulatore il limite di tensione massimo in DC è 600 V, mentre il limite di potenza in uscita dall'accumulatore è 80 kW.

Da EV5.3.2 possiamo notare che è stata obbligata la scelta di avere un'accumulatore modulare, ed ogni modulo non può superare la tensione DC di 120 V, l'energia di 6 MJ (1.67 kWh) e la massa di 12 kg.

3.1.1 Requisiti

I requisiti energetici dell'accumulatore sono stati ottenuti tramite uno studio di OptimumLap [59] che ha contribuito a dare il limite inferiore di capacità di 7 kWh. Questo valore è anche confermato da tesi di altre squadre formula sae, come quella dell'università di Canterbury [58], questi infatti utilizzano un pacco batteria composto da una configurazine di 7p141s celle cilindriche samsung INR18650-25R5, per una capacità totale di 8.8 kWh. Nella stessa tesi è stata fatta una ricerca sugli accumulatori delle altre squadre mondiali, da questo invece possiamo notare che la media dell'energia è 6.6 kWh, in linea con i nostri calcoli.

E stato possibile effettuare un'altra ricerca con la versione 2019 del magazine di Formula Sae Germany [60], la rivista ufficiale della competizione FSG, dove nelle ultime pagine è possibile trovare la lista di tutte le monoposto iscritte all'evento FSG di quell'anno, assieme ad un render grafico ed un breve riassunto con le specifiche più importanti. Analizzando la sezione dedicata agli EV, è stata costruita la tabella in appendice A che comprende il numero dei motori, la potenza di ciascuno di essi, la tensione massima e la capacità. Grazie a questi dati è stato possibile calcolare la media della capacità del Tractive System dei veicoli iscritti alla competizione. Senza contare quella del veicolo della città di KASSEL $(DE)^1$, la media della capacità è di 7 kWh.

Il secondo requisito sono i 52 kW è la potenza che richiede l'inverter, quest'ultimo è stato approfonditamete descritto nelle sue funzionalità e nella sua scelta nella Sezione 3.6.

¹Il veicolo elettrico di KASSEL con i suoi 12 kWh risulta avere la più grande capacità di tutti gli altri veicoli, questo valore è stato scartato poiché risulta troppo discostante rispetto alla media.

Specifica	Pacco	Modulo	Unit
Capacità	≥ 7	≤ 1.67	kWh
Tensione	250 to 600	≤ 120	V
Potenza	52 to 60	_	kW
Massa	_	≤ 12	kg

Tabella 3.1: Requisiti dell'accumulatore

Infine le specifiche da rispettare possono essere riassunte in Tabella 3.1 La tabella è divisa in due per mostrare le specifiche da soddisfare: sia per il pacco, che per il modulo.

OptimumLap test

Il test su OptimumLap [59] è stato svolto da Gioele Di Summa, membro del Polimarche Racing Team, nonché studente dell'UNIVPM.

OptimumLap [59] è un software gratuito distribuito da OptimumG che permette di simulare in maniera semplice la dinamica di qualsiasi tipo di veicolo su un tracciato, in questo modo è stato possibile analizzarne i dati. Questi dati sono stati d'aiuto per dimensionare varie parti del veicolo, tra cui anche l'accumulatore energetico.

La simulazione è stata svolta inserendo i parametri relativi alla Peacock 4 (il veicolo del Polimarche Racing Team che ha gareggiato nel 2019) con quelli del powertrain della futura Peacock elettrica.

Il circuito utilizzato per il test è il percorso endurance della competizione Formula Student Germany del 2012 ad Hockenheim (Fig. 3.2).

Il circuito ha una lunghezza di 1423.5 m, per soddisfare la regola D7.1.3 sarà necessario quindi compiere 15 giri (percorrendo un totale di 21.35 km)



Figura 3.2: Formula Student Germany Hockenheimring, 2012, endurance circuit

Peacock EV – Hardware

VEH Gen	ICLE SETUP	ENC Add / Remove Torque [GINE DATA	Thermal Efficiency (optional) 98,000 %
Vehicle Type FSAE	•			Fuel Energy Density (optional) LithiumIon • 720000 J/kg
Mass	Driven Type	Engine Speed (rpm)	Engine Torque (N.m)	TRANSMISSION DATA
310.000 kg	© 2WD AWD	2000 4000	21.00 21.00	Transmission Type Sequential Gearbox
Drag-Lift	Efficiency-Lift	6000 8000	21.00 21.00	Add / Remove Gears
Drag Coefficient 0,340 -	Downforce Coefficent 0.850 -	10000 12000	21.00 21.00	
Front Area	Air Density 1,225 kg/m [^] 3	14000 16000	20.00 18.00	Gear Ratios Gear 1 13,0000
Tii	re Data	20000	13,00	
Tire Radius 0.220 m	Rolling Resistance 0.030 -			
Longitudinal Friction 1.450 -	Lateral Friction 1,550 -			
EN Add / Remove Torque	GINE DATA Data			Final Drive Ratio Drive Efficiency
		Thermal Efficiency (optional)		1.000 - 90.000 %
Engine Speed (rpm)	Engine Torque (N.m)	98.000 % Fuel Energy Density (optional)		Power Factor Aero Factor 100,000 % 100,000 %
2000	21,00	LithiumIon -	720000 Uka	

Figura 3.3: Dati Peacock 4 su OptimumLap

- D7.1.2 The length of one lap of the endurance track is approximately 1 km.
- D7.1.3 The length of the complete endurance is approximately 22 km.

In Fig. 3.4 possiamo vedere il grafico della potenza[hp] erogata dal motore nel tempo in un giro. Integrando nel tempo questo risultato otteniamo l'energia necessaria a percorrere un giro completo, moltiplicata quindi per 15 otteniamo l'energia necessaria a completare il percorso endurance di Hockenheimring, che si attesta circa a 7 kWh.



Figura 3.4: Plot energia/tempo del circuito endurance di Hockenheimring, 2012

3.1.2 Scelta della cella

Chimica

Come già affrontato nel Sezione 2.1, è stato scelto di utilizzare delle celle agli ioni di litio, come la maggior parte delle case automobilistiche e delle squadre FSAE mondiali.

Package

Nella Sezione 2.2.2 sono stati mostrati i più comuni package delle celle Li-ion.

Nonostante le migliori caratteristiche elettriche delle celle pouch, si è preferito optare per le celle cilindriche, che offrono una migliore affidabilità in caso di problemi di danneggiamento (grazie alla loro rivestimento rigido in metallo comprendente di una valvola di sicurezza), ed una migliore reperibilità nel mercato (con una conseguente scelta più ampia).

La scelta del formato è andata verso le 18650, perché sono le più popolari tra le celle cilindriche, per le quali quindi si trova più documentazione e scelta.

Questa indagine potrà essere sicuramente messa in discussione negli anni successivi, ma in questo momento la priorità è quella di creare un pacco batterie affidabile ed economicamente abbordabile, tenendo a mente che questo è il primo pacco batterie realizzato dalla squadra.

Un ulteriore considerazione sulla scelta di questo tipo di cella sta nel design del sistema di raffreddamento: la struttura rigida e allungata delle 18650 risulta molto conveniente per la possibilità di avere una buona separazione tra le singole celle all'interno del pacco, senza aver bisogno di creare strutture rigide ad hoc necessarie



Figura 3.5: Grafico A/mAh di confronto tra celle 18650

per raffreddare e fornire uno scheletro rigido necessario per una cella pouch. Con un accurato studio della disposizione e del flusso di aria, sarà possibile una dissipazione del calore efficace anche senza utilizzare il raffreddamento a liquido, cosa che sarebbe più complessa con delle celle pouch.

Per una maggiore modularità del pacco batterie, e per la regola EV5.3.1, si è deciso di utilizzare una configurazione a moduli.

Confronto tra le migliori celle

Una ricerca di mercato effettuato nel dicembre 2018 (appendice B) mostra le migliori tra le celle 18650 disponibili in quel momento nel mercato, con le loro caratteristiche ed i loro prezzi².

Nel grafico in Fig. 3.5 abbiamo confrontato la capacità e la corrente erogabile dichiarata di tutte le celle che avessero un prezzo inferiore a $3.5 \in$. Le celle migliori risultano essere:

Cella	Capacità [mAh]	Discharge Rate [A]	Prezzo€
Sony VTC4	2100	30	3.35
Sony VTC5	2600	20	3.65
Samsung $30Q$	3000	15	3.75
Panasonic BD	3200	10	3.35

Tabella 3.2:	Migliori	celle	18650	con	prezzo	≤ 3.5	€
--------------	----------	-------	-------	----------------------	--------	------------	---

²Il sito utilizzato è eu.nkon.nl, scelto per la sua affidabilità e per i prezzi contenuti

Volendo utilizzare meno batterie possibili, sia per una questine economica, che di peso, si è deciso di scegliere la cella per la quale possiamo ottenere la più alta capacità per il pacco, con il minor numero di batterie.

Dimensioni dell'accumulatore

La scelta della configurazione del modulo è stata influenzata da un componente terzo: infatti grazie alla scelta dell'adc ltc6813 (approfondito inSezione 3.2.1) il modulo può essere formato da un massimo di 18 batterie in serie. Prendendo in considerazione il range di tensioni tipico di una cella Li-ion in Tabella 3.3:

Treshold	Nominale	Cutoff	Unit
4.2	3.6	2.5	V

Tabella 3.3: 7	Tensioni	tipiche d	li una	cella	Li-ion
----------------	----------	-----------	--------	-------	--------

La Tabella 3.4 mostra la tensione totale di un possibile pacco (V_{ts} : tensione Tractive System) al variare dei numeri delle celle in un modulo, e dei moduli in un pacco. Questi valori sono stati ottenuti considerando i casi in cui la tensione di tutte le batterie sia una tra le tre tensioni tipiche: $V_{th} = 4.2$, $V_{nom} = 3.6$, $V_{cutoff} = 2.5$. Sono state eliminate eliminate le configurazioni che non erano conformi al regolamento ($V_{ts} \leq 600$ V, o che non soddisfacevano i requisiti minimi di tensione dell'inverter ($V_{ts} \geq 250$ V).

		Celle						
		18	17	16	15			
	9	<u>680 584 405</u>	643 550 382	605 519 360	$567 \ 486 \ 338$			
ıli	8	<u>605 519 360</u>	$571 \ 490 \ 340$	$537 \ 461 \ 320$	$504 \ 432 \ 300$			
odı	7	$530\ 454\ 315$	$500\ 429\ 298$	471 404 280	378 378 263			
Z	6	453 389 270	$429 \ 367 \ 255$	404 346 240	378-324-225			
	5	378-324-225	357 306 213	336-288-200	315-270-188			

Tabella 3.4: Analisi tensioni con diverse configurazioni di batteria [V]

La scelta finale della configurazione è stata condizionata dalla volontà di un design più modulare possibile (8-9 moduli per pacco), trovando un equilibrio tra peso totale, costo e potenza erogabile dalla singola cella.

Considerando il peso medio di una batteria 18650 che è 45 g, la restrizione sul peso di un modulo è abbondantemente rispettata (massa totale delle celle nel modulo ≤ 6.885 kg).

Ipotesi 5 paralleli

Ipotizzando di avere una batteria con configurazione Xs5p, sfruttando quanto è stato ipotizzato nel capitolo precedente, possiamo tracciare la Tabella 3.5 che mostra la corrente che una singola cella erogherebbe nel picco della potenza richiesta dall'iverter nel caso avessimo 5 paralleli. La formula utilizzata è:

$$I_{cella} = \frac{P_{TS}}{N_{moduil} \cdot N_{celle} \cdot N_{paralleli} \cdot V_{nom}}$$

Per chiarezza, N_{celle} è il numero di celle in un modulo, V_{nom} è la tensione nominale della cella (3.6 V), P_{TS} è la potenza erogata dal Tractive System, cioè quella richiesta dall'inverter (52 000 W)

		Celle				
. –		17	16	15		
lub	9	18.88	20.06	21.40		
Mod	8	21.24	22.57	24.07		

Tabella 3.5: Correnti che eroga la singola cella con 5 paralleli (I_{cella}) [A]

Notiamo che l'unica cella che riesce ad erogare questa mole di corrente è la Sony VTC4, ma se calcoliamo la capacità totale del pacco, nessuna configurazione riesce a superare la soglia di 7 kWh, quindi dobbiamo optare per un maggior numero di celle in serie.

$$C_{Pacco} = N_{moduil} \cdot N_{celle} \cdot N_{paralleli} \cdot C_{nom}$$

Ipotesi 6 paralleli

Allo stesso modo, ipotizzando di utilizzare 6 celle in parallelo, le correnti erogate dalla singola cella sono:

		Celle		
		17	16	15
qul	9	$\frac{15.73}{15.73}$	16.72	17.83
Mod	8	17.70	18.60	20.06

Tabella 3.6: Correnti che eroga la singola cella con 6 paralleli (I_{cella}) [A]

Notiamo che entrambe le celle sony (VTC4 e VTC5) sono adeguate per erogare la corrente del pacco (a meno della configurazione 15x8 celle, che si trova al limite per le VTC5(20.06A)). Possiamo ora controllare se si soddisfino i requisiti di capacità, verrà quindi analizzata la capacità del pacco batteria con diverse configurazioni di 6 Sony VTC5 in parallelo, dato che la capacità della singola cella va a favore di quest'ultime(2.6 Ah VTC5 contro 2 Ah VTC4)

			${\rm Celle}$	
• –		17	16	15
dul	9	8.59	8.09	7.58
Mot	8	7.64	7.19	6.74

Tabella 3.7: Capacità del pacco batteria con diverse configurazioni di 6 sony VTC5 in parallelo [kWh]

Per soddisfare la specifica di capacità basta salire al di sopra del valore di 7 kWh, la soluzione che soddisfa tutti i requisiti e necessita il minor numero di batterie è la configurazione 16 celle per 8 moduli e 6 paralleli. La configurazione finale è 12886p.

	modulo	totale	unit
n. moduli	—	8	—
n. celle	96	768	_
Tensione nominale	56.6	460.8	V
Tensione Massima	67.2	537.6	V
Capacità	0.9	7.19	kWh
Corrente massima erogabile	_	120	А
Peso (solo celle)	4.23	33.86	kg

Tabella 3.8: Caratteristiche finali dell'accumulatore 128s6p sony VTC5

3.1.3 Sony VTC5

La cella Sony VTC5 è particolarmente apprezzata in molti ambiti, infatti è possibile trovarle facilmente in commercio, anche in grandi quantità ed a buon prezzo.



Figura 3.6: Sony VTC5 [62]

Peacock EV – Har	dware
------------------	-------

Name	Sony US1865	0VTC5 2600n	nAh (Green)			
Cell	Sony US18650VTC5 2600mAh					
Supplier	Akkuteile.de		Date:	6-2014		
Size	Weight:	44.1 g	Length:	65.0 mm	Diameter:	18.2 mm
Info	Top:	flat	Bottom:	metal	Rated A:	30
Test condition	Ch	arge voltage:	4.2	Termina	tion current:	0,1
Test current (A)	0,2	0,5	1	2	3	5
Measured capacity (Ah)	2,560	2,555	2,531	2,493	2,473	2,466
Measured energy (Wh)	9,427	9,376	9,248	9,028	8,881	8,723
PCB protection trip current (A)	NA					
Calculated internal resistance (ohm)	0,04					

Figura 3.7: Sony VTC5 specs [62]

Grazie alla loro fama sono state soggette a molti test indipendenti da parte di altrettanti utenti su internet, di particolare interesse è la tabella di Mooch³ (appendice C): è una tabella creata dall'omonimo utente su internet che mette a confronto diverse batterie tramite dei test indipendenti che ne dimostra la bontà o meno della corrente di scarica riportata nei datasheet.

Il test appena citato conferma che la cella è capace di erogare in sicurezza una corrente di 20A.

In Fig. 3.7 sono riassunte alcune caratteristiche riportate nel datasheet [61] della cella VTC5, e sono anche riportati alcuni test effettuati dal sito lygte-info.dk [62]. Il formato di queste batterie agli ioni di litio è 18650, la chimica utilizzata nel catodo in è la NMC ($LiNiMnCoO_2$).

3.2 Accumulator Management System – AMS

L'Accumulator Management System è un circuito obbligatorio, descritto nella sezione EV5.8 del regolamento [4], che monitora la corrente, la tensione e la temperatura delle celle che fanno parte dell'accomulatore del veicolo.

EV5.8.1	Each TS accumulator must be monitored by an AMS whenever the LVS is active or the accumulator is connected to a charger.
EV5.8.2	The AMS must continuously measure:
	• all cell voltages

• the TS current

 $^{^{3}}$ La tabella di Mooch non è assolutamente una fonte verificata dalla comunità scientifica, ma la sua popolarità ne garantisce in un certo modo l'affidabilità

- the temperature of thermally critical cells
- for lithium based cells: the temperature of at least 30% of the cells equally distributed within the accumulator container(s)

In pratica l'AMS si presenta come il corrispettivo di quello che in Sezione 1.2.3 abbiamo chiamato BMS.

Nel mercato è possibile trovare diversi produttori di BMS pre-costruiti, la squadra ha però deciso di evitare questa soluzione perchè nella competizione statica di design avrebbe fatto guadagnare meno punti rispetto ad una soluzione self-made, ed inoltre sarebbe risultata più costosa.

Grazie alla collaborazione con il nostro sponsor Arrow [64], che ci ha fornito le varie dev board per iniziare le varie fasi dello sviluppo, è stato possibile costruire il nostro AMS con una configurazione master-slave utilizzando il circuito integrato LTC6813-1 [65] che è l'adc tecnologicamente più avanzato prodotto da Analog Devices.

3.2.1 ADC – LTC6813-1

l'integrato LTC6813-1 [65] in Fig. 3.8 è un adc in grado di monitorare 18-Celle che comunica con il resto del BMS in Daisy Chain. Le caratteristiche principali sono:

- Certificato AEC-Q100 per applicazioni automotive.
- Misurazioni fino a 18 batterie in serie.
- 2.2 mV di errore massimo di misurazione.
- Comunicazione isoSPI [66] integrata.
- Tempo di per misurare tutte le celle di 290 µs.
- 16-bit Delta-Sigma ADC.
- Pin predisposti al segnale per il bilanciamento passivo.
- 9 General Purpose Digital I/O o input analogici.

Questo adc è capace di comunicare con il proprio controllore tramite la classica interfaccia SPI, oppure in Daisy Chain con l'isoSPI [66]: una comunicazione a 2 cavi proprietaria di Linear Technology (sotto brand di Analog Devices) che promette di essere una soluzione isolata e robusta particolarmente adatta alle applicazioni automotive.

Considerando quanto detto in Sezione 3.1.2, le celle in serie di un modulo della



Figura 3.8: LTC6813-1 [65] 18-Cell Battery Monitor with Daisy Chain Interface

nostra monoposto saranno 16, quindi questo circuito integrato rispetta le nostre esigenze.

La regola EV5.8.2 esplicita che se si utilizzano le celle agli ioni di litio è necessario monitorare almeno il 30% delle celle dell'accumulatore. Nella configurazione 16s6p commentata in Sezione 3.1.2, il 30% delle celle in un modulo (96) è poco meno di 29, quindi non sarebbe possibile rimanere all'interno del regolamento con i 9 GPIO della scheda a meno di ottenere la misura di più celle con un sensore, il che ci è permesso dalla regola EV5.8.3.

EV5.8.3 Cell temperature must be measured at the negative terminal of the respective cell and the sensor used must be in direct contact with the negative terminal or less than 10 mm along the high current path away from the terminal in direct contact with the respective busbar. It is acceptable to monitor multiple cells with one sensor if this requirement is met for all cells sensed by the sensor.

La soluzione adottata è quella di posizionare ciascun sensore al centro di 4 celle, che come mostrato in Fig. 3.9 deve essere a meno di 10 mm dal terminale negativo, quindi la distanza tra le celle diventa di fatto una specifica che dovrà essere rispettata al momento della progettazione meccanica del pacco.

Il lavoro e lo sviluppo su di questo integrato è stato semplificato di molto grazie all'utilizzo della dev board DC2350A-B [67]

Con questa soluzione ci bastano 8 sensori per modulo per permetterci di misurare il 33% delle celle e porci al di sopra delle specifiche.



Figura 3.9: Posizione del sensore di temperatura tra le celle

Dev board – DC2350A-B

La scheda DC2350A-B è una dev board basata sull'integrato LTC6813-1, questa ci ha permesso di utilizzare e testare tutte le funzioni dell'adc, compreso l'utilizzo dei sensori di temperatura tramite gpio, ed il bilanciamento delle celle con una corrente di 127 mAh.

In Fig. 3.10 la scheda da noi utilizzata, i numeri fanno riferimento a:

- 1. Connettore batterie.
- 2. Led che indicano le resistenze di scarica attivate.
- 3. Connettore RJ-45 per l'iso SPI.
- 4. Pin GPIO.
- 5. Connettore spi.



Figura 3.10: DC2350A-B [67] development board

Questa scheda per essere utilizzata ha bisogno di un collegamento con un controllore che farà da master. La connessione può avvenire direttamente in SPI, o in isoSPI; per quest'ultima abbiamo bisogno di un circuito da stampare in più che converte i segnali SPI in isoSPI.

3.2.2 isoSPI interface LTC6820

l'LTC6820 [68] (fig:LTC6820-acl-fig) è un circuito integrato della Linear che consente di convertire un segnale SPI in isoSPI e viceversa, in modo da rendere più facile la comunicazione con gli integrati Linear che utilizzano la tecnologia isoSPI proprietaria.

Oltre a questo, l'LTC6820 permette anche di isolare galvanicamente la tensione che viene dal connettore isoSPI da quello SPI che va al controllore, questo ci permette di comunicare con gli adc con una maggiore sicurezza.

Anche in questo caso è stato utilizzata una dev board per velocizzare il processo di sviluppo, si tratta del DC1941D [69] (in Fig. 3.12) che possiede da una parte un connettore quadrato per l'SPI, e dall'altra un RJ-45 per interfacciarsi alle schede isoSPI.

Utilizzeremo questa scheda come interfaccia tra il nostro controllore ed il resto degli ADC.



Figura 3.11: LTC6820 [68] isoSPI Isolated Communications Interface



Figura 3.12: DC1941D [69] development board

3.2.3 Master Linduino

Quello che fa da master agli adc è il Linduino [70], è una scheda basata sul processore Atmel ATMEGA328, lo stesso dell'Arduino Uno [71]. Una caratteristica in più che ha il Linduino rispetto all'Arduino Uno è quella di essere creato già con lo scopo di comunicare con le schede Linear, per questo ha integrato il connettore quadrato che condivide con entrambe le dev-board DC2350A-B e DC1941D, permettendo di fatto una comunicazione SPI senza dover utilizzare una moltitudine di jumper. Un altro lato positivo è quello di avere un isolatore USB, in questo modo la comunicazione con il pc diventa più sicura.

Come è possibile vedere in Fig. 3.13, Linduino condivide la forma con l'Arduino Uno rendendolo compatibile con tutte le shield già create per la scheda Italiana. Un'altra cosa che condivide l'Arduino è la possibilità di poter essere programmato in C++ tramite l'IDE di Arduino, rendendolo familiare e semplice da usare.



Figura 3.13: Linduino [70] development board



Figura 3.14: Banco prove 2018-2019

3.3 Banco prove 2018-2019

Durante l'anno accademico 2019-2020 è stato allestito un banco prove (Fig. 3.14) per fare dei test con le batterie acquistate, ma soprattutto per verificare il corretto funzionamento dell'AMS sia durante la carica che la scarica. Più approfonditamente, i componenti utilizzati sono:

- 1. **DC2350A-b**: Evaluation board basata sull'ADC LTC6813 già descritta nella Sezione 3.2.1.
- 2. **DC1941D**: Evaluation board basata sull'intrefaccia isoSPI gestita dall'integrato LTC6820, già descritto in Sezione 3.2.2.
- 3. Linduino: La scheda controllore che comanda e contiene gli algoritmi di sicurezza dell'AMS (Sezione 3.2.3).



Figura 3.15: Alimentatore rigenerato da lettore DVD

- 4. Alimentatore: (Fig. 3.15) È un alimentatore rigenerato da un lettore dvd di marca Enhanche [72], oltre ad avere i classici connettori ATX, possiede anche una uscita 50V 5A (che verrà utilizzata per alimentare il nostro step up).
- 5. Step Up: (Fig. 3.16) Capace di erogare 0-15A con ingresso 8-60V ed uscita 10-120V. Facilmente reperibile vari siti di e-commerce sotto diversi nomi. Grazie allo schermo in dotazione è possibile selezionare la tensione in uscita la tensione e la corrente massima, questo ci ha permesso di implementare l'algoritmo CC/CV senza sforzo.
- 6. **Cavetteria**:(Fig. 3.17) Nel nostro banco abbiamo utilizzato per semplicità una normale breadboard, che collegata al Linduino, avrebbe pilotato i segnali



Figura 3.16: Step-up/alimentatore 10-120V regolabile



Figura 3.17: Cavetteria utilizzata nel banco prove 2018/2019

dei led e dei relay, nonchè fornire un'interfaccia scalabile con i vari switch. Per quanto riguarda i relay, è stato utilizzato un semplice modulo a 2 relay prefabbricato, facilmente reperibile in vari siti di e-commerce sotto diversi rebrand.

- 7. Carico Resistivo: (Fig. 3.18) È stato creato una serie di 8 resistenze rivestite di alluminio capaci di dissipare fino a 100 W, simili a quelli venduti da Arcol [73], ma di marca imprecisata. La configurazione (in Fig. 3.18) è stata disposta come 4 resistenze da 1 Ω ohm e 4 da 8 Ω , tutte in serie, per un totale di 36 Ω capace di dissipare 100 W.
- 8. Celle Sony VTC-5: Per testare i vari circuiti e gli algoritmi si è deciso di creare un pacco batterie 16s1p con le celle Sony VTC-5 (scelte in Sezione 3.1.3). Per il collegamento sono stati utilizzati degli holder di plastica [74] modificati e saldati tra loro per avere il collegamento in serie tra le celle e per essere collegate al connettore dell'ADC.



Figura 3.18: Pacco resistivo 36Ω , 100 W



Figura 3.19: Schema semplificato della comunicazione tra PC e ADC

3.3.1 Test 2018-2019

Grazie al banco prove 2018-2019 è stato possibile effettuare diverse prove: innanzitutto è stato verificato che la comunicazione tra pc ed adc funzionasse correttamente, successivamente è stato possibile effettuare alcune prove di carica e scarica monitorando le funzioni di sicurezza e di controllo. In Fig. 3.19 un schema semplificato della comunicazione tra le diverse schede.

In questa sezione si commenteranno i risultati ottenuti dai diversi test, senza soffermarci sugli algoritmi software utilizzati, che verranno approfonditi in Sezione 3.4. Nella repository github dove è disponibile il software [76] è possibile trovare tutte le catture delle cariche e delle scariche che sono state effettuate da giugno 2019, fino alla prima parte del 2020; queste sono state salvate in formato Matlab data, nella stessa directory è possibile trovare anche un semplice script Matlab che aiuta a visualizzare velocemente tutti i plot dei dati.

3.3.2 Scarica

La scarica è stata effettuata collegando ai capi del pacco il carico resistivo da 36Ω (Fig. 3.18).

I terminali del carico vengono collegati (in serie con un relè controllato dal Linduino) tra il capo negativo della prima batteria, ed il capo positivo dell'ultima (Fig. 3.20).



Figura 3.20: Schema cablaggio del baco prove in scarica

Durante le prime prove abbiamo notato che la chiusura del relè e il conseguente passaggio di corrente nella resistenza creava dei disturbi elettromagnetici che portavano ad un momentaneo malfunzionamento dell'adc, quindi è stato necessario creare un piccolo avvolgimento per rallentare la dinamica della corrente. Una volta che sono stati verificati tutti i collegamenti (in Fig. 3.19), per salvare i dati comunicati dall'adc è stato utilizzato CoolTerm [75]: un software che permette di visualizzare il monitor seriale di una porta desiderata e di salvarlo in un file txt. La scarica segue i seguenti step:

- 1. Vengono fatti tutti i collegamenti come in Fig. 3.20.
- 2. Il Linduino viene collegato al compiuter, successivamente viene fatta partire la registrazione dei dati nel seriale da CoolTerm.
- 3. Per far chiudere il relay viene premuto l'interruttore "discharge enable" collegato all'Arduino.
- 4. La scarica finisce quando:
 - L'interruttore "discharge enable" viene spento, interrompendo manualmente il processo.
 - Una delle celle arriva alla tensione di cutoff $V_{cutoff} = 2.5 \text{ V}$.

Prima scarica 0.62C

In Fig. 3.21 vengono mostrate le tensioni delle celle durante la scarica sul pacco resistivo da 36Ω .

Se teniamo conto della tensione nominale delle celle $V_{nom} = 3.6 \text{ V}$, possiamo approssimare la corrente che passa nel circuito resistenza-batterie come costante:

$$I_b = \frac{3.6 \,\mathrm{V} \cdot 16}{36 \,\Omega} = 1.6 \,\mathrm{A} \tag{3.1}$$

Da questi dati è possibile notare che la cella 2 (linea arancione) parte con la tensione più bassa di tutte, ed alla fine è quella che si avvicina di più alla tensione di cutoff (la scarica è stata fermata manualmente prima che questa arrivasse a V_{cutoff}). Un'altra informazione particolare la possiamo notare guardando la cella 1 (linea azzurra), questa presenta una tensione più alta di tutte le altre, anche se il valore di V_{OC} questo risultasse in linea con tutte le altre celle.

Una ipotesi, poi confermata, è che gli holder avessero dei comportamenti resistivi che durante il passaggio di corrente, fornendo all'adc una tensione sbagliata (in Fig. 3.22 una rappresentazione grafica dell'ipotesi che è stata fatta, dove la tensione letta dall'adc tra gnd e la cella 1 è $V_{adc1} = IR_{par} + V_{cell1}$).



Figura 3.21: 21/06/19. Tensioni di tutte le celle in scarica con pacco resistivo 36Ω .



Figura 3.22: Ipotesi di comportamento resistivo di uno degli holder

Scarica 0.62C - 28/10/19

La seconda prova in Fig. 3.23 mostra una scarica con lo stesso pacco resistivo, ma di durata inferiore. Di nuovo viene mostrato lo stesso comportamento anomalo della



Figura 3.23: 28/10/19. Tensioni di tutte le celle in scarica con pacco resistivo 36Ω .

prima cella che abbiamo commentato in Sezione 3.3.2.

In Fig. 3.23 notiamo anche il corretto comportamento del bms che toglie il carico quando una delle celle raggiunge la tensione $V_{cutoff} = 2.5$ V per sicurezza.

3.3.3 Carica

I terminali dell'insieme alimentatore - step up vengono collegati (sempre attraverso un relè che ne controlla il circuito) tra il capo negativo della prima batteria ed il capo positivo dell'ultima, come in Fig. 3.24.

Viene suggerito lo stesso accorgimento di aggiungere qualche avvolgimento al filo che collega l'alimentatore alle celle per evitare le interferenze elettromagnetiche.

Una volta collegato il circuito viene acceso l'alimentatore, impostato lo step up con la corrente e la tensione massima desiderata(ad esempio 2 A e 65.6 V), e tramite un pulsante diamo il comando al Linduino di chiudere il relè avviando la carica. Da qui in poi abbiamo salvato il valore di tutte le tensioni delle batterie grazie al software CoolTerm.

Non avendo momentaneamente a disposizione il sensore di corrente, la carica verrà fermata manualmente una volta che dallo schermo dello step up verrà mostrata una corrente in uscita inferiore ad 0.1 A.

La descrizione approfondita dell'algoritmo sarà affrontata in Sezione 3.4, di seguito



Figura 3.24: Schema cablaggio del baco prove in carica

un accenno su come il BMS gestisce la carica ed il bilanciamento delle celle. La scheda BMS controlla tutte le tensioni del pacco ed identifica la cella con la tensione più bassa, se c'è una cella che supera la tensione di quella più bassa di un definito ΔV , vuol dire che questa è più carica delle altre e deve essere bilanciata. Il bilanciamento consiste nel collegare in parallelo alla cella da bilanciare una resistenza di scarica $R_{balance}$ (bilanciamento attivo) senza bloccarne la carica: in questo modo la corrente che prima passava interamente all'interno della batteria ora passa in parte in $R_{balance}$, rallentando di fatto la carica della cella. L'esempio in



Figura 3.25: Esempio di resistenza di scarica attiva sulla cella 1

Fig. 3.25 mostra l'algoritmo durante l'inserimento della resistenza di scarica nella cella1 $(V_1 - V_{min} > \Delta V)$.

Nel caso la tensione della cella da bilanciare superi di molto il valore di ΔV , la carica vine interrotta e la resistenza di bilanciamento attivata per un certo lasso di tempo.

Carica - 01/08/19

I dati in Fig. 3.26 sono tra i più interessanti tra quelli acquisiti fino ad ora: è stata fatta una carica totale del modulo con le celle quasi completamente scariche (tensione iniziale di circa 3.2V) utilizzando l'algoritmo di carica appena descritto. Contemporaneamente ai dati delle tensioni, è stata acquisita anche la temperatura dell'anodo della prima cella.

La carica è durata 7981 secondi (2h e 13 minuti), dopo questo lasso di tempo è stato staccato l'alimentatore; infatti è possibile vedere nell'ultima parte del grafico un piccolo drop di tensione dovuto appunto al rilassamento delle celle dopo la carica. La temperatura mostra come la cella si scalda durante la fase a corrente costante, quando quindi passa una quantità maggiore di corrente.

Anche in questo caso è possibile notare il comportamento resistivo anomalo di uno degli holder descritto in Sezione 3.3.2.



Figura 3.26: 01/08/19. Temperatura della cella C1 e tensioni di tutte le celle in carica con algoritmo CC/CV 2 A.


Figura 3.27: Banco prove 2020

3.3.4 Aggiornamenti hardware 2020

Durante l'anno accademico 2019-2020 è stato possibile fare degli aggiornamenti hardware al banco prove, primo tra questi è l'utilizzo di novi holder che ci hanno permesso di non avere più problemi con resistenze parassite (Fig. 3.27). Sono anche state progettati e stampati in 3D dei nuovi contenitori che proteggono le schede dalla polvere e dai vari oggetti potenzialmente pericolosi per l'elettronica. Sono stati risistemati anche i cablaggi migliorando di fatto la comodità delle varie operazioni. In Fig. 3.28 la nova disposizione del banco prove.

3.4 AMS software

Il software a monte dell'AMS è stato scritto in Arduino (C++), questo è disponibile in maniera completamente open source su github [76].

È stato utilizzato il paradigma della programmazione ad ogetti, questo lo rende fortemente modulare, senza però rinunciare alla solidità che un linguaggio a basso livello come il C++ può garantire.

Il software è abbastanza auto esplicativo, in questo capitolo ne saranno commentate le principali funzioni ed operazioni.

La comunicazione SPI tra master e gli slave LTC6813 è risultata molto semplificata grazie alle librerie messe a disposizione da Analog Devices per il Linduino [77]. Nella repository appena citata [77] è possibile scaricare la cartella compressa LTSketch-book, che come spiegato nelle istruzioni non è altro che una cartella di librerie



Figura 3.28: ADC ed older nel banco prove 2020

Arduino contenenti diversi codici di esempio, che semplificano molto l'utilizzo della comunicazione tra integrati Linear.

void loop()

In Appendice D il flow chart della funzione void loop: la funzione che cicla all'infinito all'interno della scheda Arduino Uno (o Linduino). Il nostro software [76] misura le tensioni, la corrente e le temperature ad ogni inizio del loop; successivamente viene controllato se ci sono degli errori.

Gli errori che l'AMS deve controllare sono:

- **Over voltage:** Le tensioni delle celle non devono superare quella massima definita dal produttore.
- Over temperature: In EV 5.8.4 viene imposto il limite superiore di 60 °C, oppure uno più basso se fosse segnalato dal produttore.

In EV 5.8.6 viene imposto il tempo massimo entro il quale l'errore di over temperature o over voltage deve rientrare, altrimenti il TS deve essere spento.

EV~5.8.4~ The maximum cell temperature is 60 $^{\circ}\mathrm{C}$ or the limit stated in the cell data sheet, whichever is lower.

- EV 5.8.6 The AMS must switch off the TS via the shutdown circuit, if critical voltage, temperature or current values according to the cell manufacturer's datasheet or these rules persistently occurs for more than:
 - 500 ms for voltage and current values
 - 1 s for temperature values

The accuracy, noise and sample rate of the measurement must be taken into account.

Il flow chart in Appendice D evidenzia anche come viene fatto il controllo dell'interruttore di carica, che quando viene azionato segnala che siamo entrati in fase di carica e fa partire l'algoritmo di bilanciamento. Il codice della funzione void loop() è all'interno del file main.ino [76]

Carica(cell_asic bms_ic[])

L'algoritmo descritto dal flowchart in Appendice E mostra il funzionamento dell'algoritmo di carica delle celle. Questo algoritmo è molto importante pechè permette di controllare una tra le fasi critiche del pacco batteria di un veicolo che è appunto la carica.

Il codice come prima cosa controlla le tensioni di tutte le celle, se ne trova almeno una la quale tensione è maggiore o uguale ad una tensione di soglia, questa entra in un loop dedicato alle batterie quasi completamente cariche. Se la batteria controllata non è quasi completamente carica, entra ne loop principale: qui viene individuata la tensione più bassa del pacco, e nel caso trovassimo una cella con una tensione maggiore di ΔV rispetto a quella più bassa viene attivata la resistenza di scarica (come mostrato in Fig. 3.25). Nel caso la tensione della cella sia superiore di $2 \cdot \Delta V$ vuol dire che c'è un problema durante la carica, quindi viene staccata l'alimentazione e viene eseguito il greater balance: che è un bilanciamento più invasivo che viene eseguito in assenza di corrente.

Una volta che l'algoritmo ha deciso se e in che modalità fare il bilanciamento, la funzione ritorna falso (cella non carica) e passa il controllo ad un'altra cella.

Quando ci troviamo in final balance, l'algoritmo si comporta in modo analogo, la differenza sta nella soglia di ΔV che risulta più restrittiva (trattandosi di una batteria con una tensione molto vicina a quella massima). Dopo che viene scelto se bilanciare la cella o meno all'interno di final balance, la funzione ritorna true, il che identifica che la cella ha raggiunto la soglia massima. Quando tutte le celle saranno cariche (tutte le funzioni ritornano true) l'AMS aspetta che la corrente in

entrata al pacco sia abbastanza bassa (ad esempio $0.1\,\mathrm{A}$) per segnalare la carica completa e fermare la carica.

Gestione degli oggetti

Il cardine del codice come già detto è la programmazione ad oggetti, in Appendice F viene mostrato uno schema che mostra come sono inizializzati i vari oggetti e la gerarchia che intercorre tra loro.

Come in un pacco batteria reale, un oggetto **pacco** crea e possiede più sotto-oggetti **modulo**, che a loro volta creano e possiedono un numero n di celle ed ntc (sensori di corrente).

Come specificato nello schema in Appendice F, questo non è uno schema a blocchi del codice, quindi l'oggetto pacco non è il genitore di modulo, e quest'ultimo non eredita le funzioni di pacco (vale la stessa cosa per la relazione tra modulo e cel-le/ntc).

Quando il programma viene avviato, viene creato un oggetto pacco, che a seconda della quantità impostata creerà degli oggetti modulo dei quali conserverà i puntatori (la stessa cosa accade tra i moduli e le celle/ntc). In questo modo nel void loop() quando chiameremo una funzione dell'oggetto pacco, questo chiamerà la funzione negli n moduli creati, che a loro volta chiameranno la funzione delle proprie celle ed NTC.

Questo approccio rende il software altamente scalabile e molto comodo da utilizzare, si fa l'esempio della chiamata alla funzione ErrorCheck(cell_asic bms_ic[]): questa funzione controlla gli errori di over voltage ed over temperature. Ciclicamente possiamo chiamare la funzione all'interno del file main come pacco.ErrorCheck(bms_ic), questo a sua volta chiamerà la stessa funzione nei vari oggetti modulo istanziati all'interno di se stesso, questi a loro volta domanderanno agli oggetti cella ed ntc rispettivamente se ci sono delle tensioni o delle temperature anomale; nel caso queste si ripresentassero per più del tempo massimo stabilito, verrà chiamata la procedura di sicurezza di spegnimento del TS.

Acquisizione dei dati

Le schede Arduino Uno hanno la capacità di comunicare tramite il computer con un'interfaccia USB tramite connessione seriale, il nostro software sfrutta questa capacità per poter stampare e conservare i dati acquisiti dall'AMS su computer. I dati acquisiti avranno la seguente struttura:

```
Tempo;Messaggio;Tensione(1,1);...;Tensione(1,N);Temp(1,1);...;
Temp(1,N);...;Tensione(m,N);...;Temp(m,N) \NL
```

Salvando i dati in un foglio di testo, risulta molto semplice gestirne i dati come file .csv, per poi importarlo su Matlab o su un foglio di calcolo.

I dati acquisiti dalla comunicazione seriale con il PC possono essere salvati con software di terze parti come CoolTerm [75] o tramite uno script matlab sviluppato appositamente per questo scopo scaricabile su github: real_time_serial_2_matlab_table [78].

3.5 AMS Polimarche Racing Team V1

Il progetto del futuro AMS è la naturale evoluzione del banco prove che abbiamo utilizzato fino ad ora.

Si baserà sull'LTC6813-1 [65], ed attorno ad esso verranno costruite le nuove schede appositamente progettate per i nostri scopi.

3.5.1 Master controller

Durante le prove è sempre stato utilizzato un modulo per fare le prove. Avendo la necessità di utilizzare 8 modili (qindi 8 ADC) è stato d'obbligo prendere in considerazione anche la memoria che il controllore avrebbe utilizzato.

Provando a compilare il codice per l'Arduino Uno (programmatore AVRISP mkII) ed inserendo il numero di 8 moduli , la compilazione non va a buon fine e viene segnalato che le variabili globali occupano il 107% della memoria dinamica (memoria massima 2048 B).

Per risolvere il problema si è deciso di utilizzare un controllore con maggire memoria, la prima soluzione pensata è stata quella di utilizzare l'Arduino Mega 2560 [79]. Anche se questa sia la soluzione più semplice, non risulta la più efficiente per quanto riguarda gli spazi considerando la dimensione della scheda di 101.52 mm x 53.3 mm. Una seconda soluzione potrebbe essere quella di utilizzare una scheda basata sull'architettura ARM come le schede Nucleo [80], il problema di queste però è che non esiste del supporto ufficiale per caricare codice Arduino sulla scheda, quindi



Figura 3.29: ESP32-DevKitC [83]

non sarebbe possibile più utilizzare le librerie Linduino [77]. Come ultima soluzione è stato scelto di utilizzare una scheda basata sul micro controllore esp32 [81], questo controllore deve la sua fama grazie al fatto di essere molto economico e molto semplice da utilizzare, infatti le dev board costruite attorno a questo possono essere direttamente programmate con l'Arduino IDE utilizzando l'Arduino Core [82] ufficiale dell'azienda produttrice del chip Espressif.

Tra le caratteristiche principali del controllore esp32-wroom (variante di esp32, Fig. 3.29):

- Design robusto e pensato per essere utilizzato anche in temperature che variano tra $-40\,^{\circ}\mathrm{C}\sim125\,^{\circ}\mathrm{C}$
- Ultra-Low Power Consumption.
- WiFi e Bluetooth integrati.
- 520 kB memoria SRAM per dati e le istruzioni.
- Microprocessre Xtensa® dual-core 32-bit.
- Disponibilità di diversi protocolli di comunicazione, tra cui SPI.

La caratteristica molto interessante sono i 520 kB di memoria SRAM (rispetto ai 2 kB di un Arduino Uno). Oltre a questo, se si decide di utilizzare direttamente una delle Dev Board costruite dai vari produttori di terze parti, le loro dimensioni risultano abbastanza contenute (54.4 mm x 27.9 mm).

Scelto questo controllore, grazie alla sua compatibilità con il linguaggio Arduino [82] non dovrebbero esserci grandi stravolgimenti del codice.

3.5.2 ADC slaves

Per un controllo efficace e sicuro dei moduli che compongono il pacco è stato necessario dimensionare e progettare le nuove schede ADC slaves in modo accurato. Il focus principale è stato quello di avere una scheda robusta con particolare attenzione all'interfaccia di comunicazione.

Come già discusso in Sezione 3.2.1 è stato scelto l'integrato LTC6813-1 che adempie perfettamente ai nostri scopi, quindi è stata disegnata attorno a lui la scheda ADC - Polimarche Racing Team V1 in figura Fig. 3.34.

Resistenza di scarica

Prima di tutto sono state dimensionate le resistenze di scarica: secondo la ricerca pubblicata "Battery Management System Hardware Concepts: An Overview" [84] in ambito automotive viene molto spesso utilizzato un bilanciamento passivo con una corrente di scarica da 100 mA.

Tenendo conto che il tasso di self discharge di una cella Li-ion è di $5\% \sim 10\%$ [85], con la configurazione 6p le nostre celle Sony VTC5 perderebbero una quantità di carica compresa tra $750 \text{ mAh} \sim 1500 \text{ mAh}$. Potenzialmente, all'interno del pacco, due paralleli di celle potrebbero avere una differenza di carica di 750 mAh dopo un mese (nel caso peggiore che una cella perda il 5% e l'altra il 10%), quindi la resistenza dovrebbe essere in grado di bilanciare questa differenza entro il tempo totale di carica del pacco. Considerando che il pacco si carichi con algoritmo CC/CV utilizzando il limite di corrente a 12 A, allora ogni cella vede una corrente pari a 2 A. Questa è una situazione del tutto simile alle prove commentate in Sezione 3.3.3, quindi possiamo tenere conto di un tempo medio di carica completa del pacco di 2h e 30minuti circa; in questo modo avremo bisogno che all'interno delle resistenze di scarica scorra una corrente di:

$$\frac{750\,\mathrm{mAh}}{2.5\mathrm{h}} = 300\,\mathrm{mA} \tag{3.2}$$

Considerando la tensione nominale delle celle 3.6 V, la resistenza di scarica necessaria risulta:

$$\frac{3.6\,\mathrm{V}}{0.3\,\mathrm{A}} = 12\,\Omega\tag{3.3}$$

Una volta trovato il valore di resistenza desiderato è stato semplice cercare una resistenza che potesse essere utilizzata in sicurezza.

È stata scelta scelta la resistenza PWR221T-30 prodotta da bourns [86] (Fig. 3.30), tra le caratteristiche principali possiamo annoverare:

- Certificazione automotive AEC-Q200.
- Backplane ceramico.



Figura 3.30: pwr221t-30 [86]

- Potenza massima dissipabile 30 W.
- Temperatura di lavoro massima 150 °C.
- Coefficiente di temperatura 300 PPM/°C.
- Tolleranza 1%.

La resistenza secondo i calcoli fatti dovrebbe dissipare circa:

$$3.6 \,\mathrm{V} \cdot 0.3 \,\mathrm{A} = 1 \,\mathrm{W} \tag{3.4}$$

È stata fatta una scelta di sovradimensionamento per lasciare aperta la possibilità di poter cambiare il valore di resistenza in un futuro se questa si dovesse rilevare troppo alta. Oltre a questo il design a foro passante ed allungato ci ha permesso di non avere problemi per quanto riguarda la dissipazione del calore e di risparmiare spazio nella scheda (essendo molto stretta con 3.18 mm).

Mosfet

La seconda modifica da apportare al circuito rispetto a quello della dev board DC2350A-B è quella di utilizzare un mosfet esterno per far passare la corrente di scarica al posto di far passare la corrente all'interno dell'integrato, dato che la corrente massima è di 200 mA [65]. Il datasheet dell'ADC [65] consiglia di utilizzare dei mosfet esterni di tipo p come in Fig. 3.31.



Figura 3.31: Esempio circuito di scarica esterno per ltc6813-1 [65]

Il mosfet scelto è stato il DMP1045U-7 prodotto dalla Diodes [87], le sue caratteristiche principali sono:

- Package SOT23.
- $I_d \max 4.3 \,\mathrm{A}$.
- $V_{th} 0.55 V.$
- $V_{qs} 2.5 \text{ V}$ (corrente continua di drain a 25 °C): 2.6 A.

La tensione delle celle varia tra $2.6 \text{ V} \sim 4.2 \text{ V}$, quindi in ogni caso è possibile utilizzare il mosfet come switch ad una corrente I_d massima di 2.6 A, ben oltre le nostre specifiche, quindi sicuramente adatto.

isoSPI interface

Un ultimo appunto importante durante la progettazione del circuito e la la parte dedicata alla comunicazione isoSPI, che è di fondamentale importanza per l'affidabilità del controllo.

Anche in questo caso il datasheet dell'ltc6813-1 [65] ci consiglia come costruire l'interfaccia isoSPI: è consigliato utilizzare un trasformatore con tap centrale per ridurre i rumori come in Fig. 3.32.

Il trasformatore scelto è HM2112ZNLT prodotto dalla Pulse [88], la sua particolarità è quella di avere nello stesso package due trasformatori con tap centrale, questo è stato inserito anche nel datasheet ltc6813-1 [65] come trasformatore consigliato.

Nel datasheet LTC6820 [68] vengono anche segnalate delle accortezze fisiche da osservare nella costruzione dell'interfaccia isoSPI, come le distanze da mantenere e dove inserire il pianale gnd. In Fig. 3.33 il layout di esempio.



Figura 3.32: Esempio circuito di trasformatore per interfaccia isoSPI [88].



Figura 3.33: Layout di esempio interfaccia isoSPI [68].

ADC - Polimarche Racing Team V1

Tenuto conto di tutte le accortezze descritte nelle sezioni precedenti, è stata costruita la scheda ADC - Polimarche Racing Team V1. In Fig. 3.34 è possibile apprezzare un render 3D della scheda.

Sia il disegno dello schematico che quello della PCB sono stati fatti utilizzando Kicad [89]: è un software di disegno di schemi elettronici e circuiti stampati gratuito ed open source. Lo schema elettrico si trova in Appendice G, questo è diviso in due fogli: nel primo vengono mostrati i collegamenti tra l'integrato ltc6813, l'interfaccia isoSPI e i connettori dei sensori di corrente NTC. Nella seconda pagina sono evidenziati i collegamenti tra le celle ed il circuito di scarica.

Il circuito stampato è stato pensato per occupare il minor spazio possibile, con l'accortezza di non superare il limite in altezza di 80 mm imposta dal reparto che si è occupato della progettazione fisica del modulo. In Fig. 3.35 è possibile vedere il lato inferiore della scheda.



Figura 3.34: ADC - Polimarche Racing Team V1. Vista frontale



Figura 3.35: ADC - Polimarche Racing Team V1. Vista inferiore

3.5.3 SPI-isoSPI converter

Per comunicare con l'integrato LTC6813-1, la scheda master ha bisogno di convertire il proprio segnale di comunicazione da SPI ad isoSPI, e viceversa (come già commentato in Sezione 3.2.2).

A tale scopo è stata progettata una scheda basata sull'integrato LTC6820 che trasforma il classico canale di comunicazione spi a 4 pin (più 2 di alimentazione della scheda) in isoSPI.

Il grande vantaggio è quello di poter utilizzare un canale di comunicazione in daisy chain, con solo due cavi che trasportano il segnale. Il secondo vantaggio si trova nel fatto che ADC e linea SPI vengono isolate galvanicamente, aumentandone la robustezza. In Fig. 3.36 è possibile vedere il render 3d della scheda



Figura 3.36: SPI-isoSPI converter Polimarche Racing Team V1

3.5.4 Sensore di corrente

Un sensore di fondamentale importanza all'interno di un AMS è il sensore di corrente, infatti l'informazione della corrente può essere utilizzata oltre che per segnalare gli errori di over-current, anche per il calcolo della potenza in uscita dal pacco batterie, il calcolo dello SOC e per segnalare la fine della carica nell'algoritmo CC/CV. La soluzione più economica e semplice è quella di applicare al circuito una resistenza di Shunt: è un resistore di resistenza nota che si inserisce in serie al circuito, quando della corrente passa attraverso ad esso possiamo misurare la caduta di tensione ai suoi capi e calcolarne la corrente che lo attraverra. Questo tipo di approccio non è il più utilizzato, infatti il primo problema è quello che la corrente scorrendo all'interno del resistore produce calore, che oltre ad avere la necessità di essere dissipato, aggiunge rumore alla misura. Un altro problema che si pone è quello del range della tensione che sarà misurata: infatti il nostro veicolo avrà bisogno di una misura della corrente precisa sia in carica che in scarica, questo vuol dire che avremo bisogno di misurare una tensione positiva in un caso o negativa nell'altro (cosa che non sarebbe possibile utilizzando le porte GPIO dell'ltc6813). Questo può essere risolto grazie un sensore di corrente prefabbricato con input range in entrambe le direzioni, questo però ne dimezza di fatto il range.

Una soluzione comune in automotive è quella di utilizzare un sensore che sfrutta la legge di Faraday sull'induzione magnetica

$$\oint_c \vec{B} \, \vec{ds} = \mu_0 \cdot i_c \tag{3.5}$$

Questo tipo di sensori sono anche detti sensori ad effetto hall. Un'applicazione comune è possibile vederla in Fig. 3.37: viene fatta passare della corrente all'interno di un materiale ferromagnetico, quindi per la legge dell'induzione magnetica all'interno di esso si verrà a formare un flusso magnetico. Il flusso magnetico sarà poi captato dal sensore effetto hall posto all'interno del core magnetico.

Il grande vantaggio di questo approccio è quello di mantenere il sensore galvanicamente isolato (al contrario della resistenza di shunt) e di avere una buona robustezza contro le sovratensioni.



Figura 3.37: Sensore di corrente effetto hall a loop aperto [90]



Figura 3.38: LEM CAB 500-C/SP5 [91]

LEM CAB 500 sensore di corrente

Il sensore LEM CAB 500-C/SP5 [91] è uno tra i sensori di corrente più utilizzati in automotive, questo grazie alla sua affidabilità, al suo design che si basa sull'effetto hall senza contatto, nonchè per la sua semplicità di utilizzo, dato che il segnale in uscita è un segnale digitale can bus.

Tra le sue caratteristiche principali troviamo:

- Corrente nominale in input: $-500 \,\mathrm{A} \sim 500 \,\mathrm{A}$.
- Uscita: Instantaneous CAN.c.
- Tensione di alimentazione: 12 V.
- Accuratezza: 0.5 %.
- Temperatura di operazione: -40 °C~85 °C.
- Tecnologia: Open loop Fluxgate CAB type.

3.5.5 Accumulator Isolation Relays - AIR

Gli AIR (Accumulator Isolation Relays) sono un componente fondamentale nel pacco batteria di un veicolo elettrico, queste salvaguardano la sicurezza del pilota nel caso di problemi con l'accumulatore: sono dei relay N.O. capaci di lavorare con tensioni e correnti molto elevate. Sono responsabili dell'apertura del circuito tra l'accumulatore ed il resto del veicolo.

Il regolamento [4] ne richiede due all'interno di un veicolo FSAE.

EV 5.6.1	At least two AIRs must be fitted inside each TS accumulator container.
EV 5.6.2	The AIRs must open both poles of the TS accumulator. If the AIRs are open, no TS voltage may be present outside of the accumulator container and the vehicle side of the AIRs must be galvanically isolated from the accumulator side, see EV1.2.1.
EV 5.6.3	The AIRs must be mechanical relays of a "normally open" type. Solid-state relays are prohibited.

Questi relay devono essere "rated" secondo la tensione massima e la corrente massima del TS. Oltre a questo un'altra importante caratteristica da rispettare è quella di poter segnalare lo stato del contatto (aperto o chiuso) in qualunque caso, anche se quest'ultimo è incastrato o saldato: come richiesto in EV 4.10.2 e EV 4.10.4 (dove viene descritto il comportamento che deve assumere il TSAL, Tractive System Active Light, EV 4.10)

EV 4.10.2 The TS is active when ANY of the following conditions are true:

- An accumulator isolation relay is closed.
- The pre-charge relay, see EV5.7.3, is closed.
- The voltage outside the accumulator container(s) exceeds 60 VDC or 25 VAC Root Mean Square (RMS).
- EV 4.10.4 The mentioned states of the relays (opened/closed) are the actual mechanical states. The mechanical state can differ from the intentional state, i.e. if a relay is stuck. Any circuitry detecting the mechanical state must meet EV5.6.2.

Contattore TDK B88269X1060C011

Per poter poter soddisfare EV 4.10.4 sono molto usati i contattori con dei contatti ausiliari per acquisire il reale stato dei contatti, come il Contattore TDK B88269X1060C011 [92].

I contatti ausiliari sono dei contatti che sono aperti o chiusi a seconda dello stato



Figura 3.39: Contattore TDK B88269X1060C011 [92]

fisico del contatto del relay, in questo modo possiamo conoscere con certezza lo stato del relay. Le caratteristiche principali del contattore TDK B88269X1060C011 sono:

- Tensione nominale dell'avvolgimento in DC: 12 V.
- Tensione di operazione massima in DC: 900 V.
- Corrente di operazione massima: 200 A.
- Temperatura di lavoro: -40 °C~85 °C
- Contatti ausiliari: SI

3.6 Powertrain

La scelta di Powertrain di un BEV è molto importante per permettere un buon compromesso tra prestazioni ed efficienza.

Nei BEV possiamo trovare più di una configurazione di Powertrain [93], questo grazie alla compattezza e alla scalabilità dei motori elettrici, oltre che per l'assenza di molte parti meccaniche mobili che erano necessarie per i motori a combustione. Un'architettura molto apprezzata però è la All Wheel Drive (AWD, ciascuna ruota possiede un proprio motore che la muove), questa garantisce un migliore controllo della trazione per evitare gli sbandamenti. Un secondo vantaggio dell'architettura AWD è quella di poter dare la possibilità di utilizzare motori più piccoli, e di conseguenza i sistemi di raffreddamento risultano più semplici ed efficaci, aumentando l'efficienza complessiva della macchina.



Figura 3.40: AMK FSE RACING KIT [94]

3.6.1 AMK FSE RACING KIT

È stato scelto un kit di motori prodotti da AMK [94] appositamente per le competizioni Formula SAE, questa scelta è stata fatta sia perchè si tratta di una delle più preformanti ed utilizzate soluzioni nelle competizioni formula sae, sia per la loro semplicità di utilizzo, che permettono di abbattere i tempi di progettazione che ne richiederebbe un motore self-made. In Fig. 3.40 uno schema semplificato di come è montato il kit in una vettura Formula SAE.

Questo kit comprende sia i 4 motori da montare (uno per ruota), che il modulo inverter.

Nel sito del produttore [94] il modello scelto dal nostro team è quello segnalato come "WITH CONTROLLER CARD -R25"

Motori AMK

I 4 motori che compongono il kit (Fig. 3.41) sono asincroni a magneti permanenti, le loro caratteristiche principali sono:



Figura 3.41: Motore - AMK FSE RACING KIT [94]

- Coppia di stallo: 13.8 Nm.
- Coppia massima: 21 Nm.
- Coppia nominale: 9.8 Nm.
- Potenza nominale: 12.3 kW.
- Velocità nominale: 12000 rpm.
- Velocità senza carico: 18617 rpm.
- Tensione nominale: 350 V.
- Corrente nominale RMS: 41 A.
- Massa 3.55 kg.

La loro compattezza li rende adatti ad essere montati nei pressi di ciascuna ruota, sarà necessario però costruire un motoriduttore che ne riduca la velocità ai motori. Come segnalato dal datasheet [94] questi motori sono predisposti al raffreddamento a liquido.

Inverter AMK

L'inverter incluso nel kit è formato da due moduli separati, ciascuno di loro pilota due dei motori nel veicolo (Fig. 3.42).

Le caratteristiche principali di ciascun inverter sono:

- Range di tensioni DC in input: 250 V~720 V.
- Corrente di input a tensione nominale (540 V): 48 A.



Figura 3.42: Inverter - AMK FSE RACING KIT [94]

- Potenza in output: 26 kVA.
- Efficienza: 98%.
- Comunicazione: CAN bus 2.0 A.

Questo tipo di inverter risulta particolarmente semplice da integrare nel veicolo: innanzitutto grazie la sua predisposizione a lavorare con i motori dello stesso kit, ma altrettanto per la sua praticità di comunicazione con il resto della macchina (tramite il protocollo CAN bus).

Appendice A

Confronto tra i Tractive Sistem delle monoposto EV della competizione FSG 2019

Team	n.motori	Potenza[kW]	Max voltage[V]	Capacity[kWh]
AMBERG (DE)	4	35.4	600	7.98
AACHEN (DE)	4	32	600	7.02
BARCELLONA (ES)	4	35.36	600	7.14
BAYREUTH (DE)	4	35	588	6.84
BERLIN (DE)	2	36	588	6.52
BRAUNSCHWEIG (DE)	2	35	600	7
CHEMNITZ (DE)	1	75	452	7.24
DARMSTADT (DE)	4	52	443	5.8
DRESDEN (DE)	4	35	588	6.8
EINDHOVEN (NL)	4	30	400	7.0
FREIBERG (DE)	2	50.7	395	6.88
GÖTTINGEN (DE)	1	80	454	7.52
HELSINKI (FI)	2	37	598	7.03
JINZHOU (CN)	2	80	504	7.28
KARLSRUHE (DE)	4	26.7	600	7.34
KASSEL (DE)	4	41	600	12
KIEL (DE)	4	35	600	6.5
LAUSANNE (CH)	1	100	600	8.65
LEMGO (DE)	2	60	600	6.4
LEUVEN (BE)	4	37	600	5.5
LISBOA-1 (PT)	1	100	400	7.9
LISBOA-2 (PT)	4	35	600	7.98
LIUZHOU (CH)	1	75	436	7
LJUBLJANA (SI)	2	70	450	8.8
MADRID (ES)	4	27.3	580	7.15
MANNHEIM (DE)	2	80	504	6.39
MUMBAI (IN)	1	80	470	9.87
MÜNCHEN (DE)	4	35	600	7
NEW DELHI (IN)	2	36	100	8.87
PADOVA (IT)	4	35	596	6.7
RAVENSBURG (DE)	4	41	403	7.62
SANKT AUGUSTIN (DE)	4	36.8	600	7.78
SCHWEINFURT (DE)	1	100	587	7.75
SEVILLA (ES)	1	100	450	6.75
STUTTGART (DE)	4	34.5	600	7.55
TERRASSA (ES)	4	35	588	7.76
THESSALONIKI (GR)	2	55	357	7.46
TRONDHEIM (NO)	4	35.3	600	6.8
WOLFENBÜTTEL (DE)	4	34	600	7.14
ZÜRICH (CH)	4	37	546	6.35

 $^{*}\mathrm{La}$ potenza si riferisce a quella di ciascun motore

Appendice B

Ricerca di mercato su batterie li-ion [2017 polimarche racing team]

	ginal cost(6*kg/kw)	8,461202186	4,864	0,985955556	1,145772973	1,01292973	2,5344	4,651733333	3,814054054	2,346666667	1,056103784	2,56	1,046140541	4,21333333	2,288432432	3,441847666	6,476108108	5,076923077	1,19762963	1,752	1,68	1,243636364	1,42951619	2,232	1,724746667	1,072	3,23744	2,440533333	6,2172	5,327288579	3,501866667	3,170594595	7,437579669
ËR	arginal cost (€/w) mar	0,224840619	0,13194444	0,027314815	0,031081081	0,027477477	0,06875	0,123611111	0,101351351	0,06944444	0,028648649	0,06944444	0,032432432	0,109722222	0,066216216	0,093366093	0,175675676	0,146901709	0,036265432	0,050694444	0,048611111	0,035984848	0,039603175	0,0625	0,050694444	0,031018519	0,093055556	0,07222222	0,171875	0,14603313	0,093055556	0,087837838	0,199677289
LESS IS BETT	oal cost (6*kg/kWh) m	12,32557214	13,5111111	19,71911111	22,91545946	20,25859459	16,896	13,29066667	11,91891892	10,66666667	12,67324541	12,8	13,94854054	12,21256039	10,4019656	9,791463187	12,95221622	10,15384615	14,37155556	14,016	25,2	13,68	19,24348718	22,32	13,26728205	15,31428571	11,16358621	10,84681481	14,21074286	10,65457716	10,94333333	10,93308481	14,87515934
	inal cost(€/kWh) margi	327,5290216	366,5123457	546,2962963	621,6216216	549,5495495	458,333333	353,1746032	316,722973	315,6565657	343,7837838	347,222222	432,4324324	318,0354267	300,982801	265,610438	351,3513514	293,8034188	435,1851852	405,5555556	729,1666667	395,8333333	533,1196581	625	389,957265	443,1216931	320,8812261	320,9876543	392,8571429	292,0662598	290,7986111	302,889096	399,3545785
	cost(6) marg	3033,6	3648	2265,6	2649,6	2342,4	3801,6	3417,6	2880	1920	1221,12	2880	1843,2	3033,6	1881,6	2188,8	2995,2	2112	1804,8	2803,2	4032	2188,8	3832,32	5184	2803,2	2572,8	2572,8	1996,8	3801,6	2572,8	2572,8	2496	3801,6
	cost(6) total	3,95 🏠	4,75 🌟	2,95 🌟	3,45 🏌	3,05 🌟	4,95 🌟	4,45 🤺	3,75 🌟	2,5 🔆	1,59 🌟	3,75 🏠	2A 🔆	3,95 🏠	2,45 🔆	2,85 🔆	3,9 🌟	2,75 🔆	2,35 🌟	3,65 🏠	5,25 🖄	2,85 🔆	4,99 🌟	6,75 🏠	3,65 🌟	3,35 🏠	3,35 🌟	2,6 🌟	4,95 🌟	3,35 🏠	3,35 🌟	3,25 🌟	4,95 🌟
	er density (w/kg) cell	358,5306122	750	2297,87234	2312,5	2312,5	1500	734,6938776	755,1020408	818,1818182	1156,25	1125	1761,904762	720	822,222222	635,9375	462,5	416	1506,976744	1600	2400	1760	2680,851064	2322,580645	1625,282167	2400	794,7019868	818,1818182	611,4649682	482,9473684	734,6938776	787,2340426	511,1340206
	ev density (Wh/kg) 1C pow	246,122449	270	114,893617	115,625	115,625	225	257,1428571	241,6326531	180	96,35416667	225	132,1428571	248,4	180,888889	223,5416667	231,25	208	125,5813953	200	160	160	199,1489362	232,2580645	211,2866817	168	230,4635762	184,0909091	267,5159236	241,4736842	235,1020408	228,2978723	255,5670103
	Ener	13,492224	27,648	82,944	85,248	85,248	55,296	27,648	28,416	27,648	42,624	41,472	56,832	27,648	28,416	23,4432	17,0496	14,37696	49,7664	55,296	82,944	60,8256	96,768	82,944	55,296	82,944	27,648	27,648	22,1184	17,61792	27,648	28,416	19,03872
	Ah) power (kw)	9,26208	9,95328	4,1472	4,2624	4,2624	8,2944	9,6768	9,09312	6,08256	3,552	8,2944	4,2624	9,53856	6,25152	8,24064	8,5248	7,18848	4,1472	6,912	5,5296	5,5296	7,18848	8,2944	7,18848	5,80608	8,01792	6,2208	9,6768	8,80896	8,84736	8,24064	9,51936
	ht (ke) Total cap (k	37,632 🏠	36,864 🔆	36,096 👯	36,864 🖓	36,864	36,864 🔅	37,632	37,632 🔆	33,792 🎲	36,864 🖓	36,864 🕅	32,256 👯	38,4 🏠	34,56 12	36,864 💦	36,864 🔆	34,56 12	33,024 🖏	34,56 7	34,56 🖓	34,56 🔅	36,096 12	35,712 🔆	34,0224 12	34,56 12	34,7904 🔆	33,792 77	36,1728 🏠	36,48 🏠	37,632 🏠	36,096 🏠	37,248 🔆
	ht (s) total wei	49	48	47	48	48	48	49	49	44	48	48	42	50	45	48	48	45	43	45	45	45	47	46,5	44,3	45	45,3	44	47,1	47,5	49	47	48,5
	tare (V) weis	460,8	460,8	460,8	473,6	473,6	460,8	460,8	473,6	460,8	473,6	460,8	473,6	460,8	473,6	473,6	473,6	460,8	460,8	460,8	460,8	460,8	460,8	460,8	460,8	460,8	460,8	460,8	460,8	473,6	460,8	473,6	473,6
	Discharze (A) total vol-	4,88	11	30	30	30	20	10	10	10	15	15	20	10	10	8,25	9	5,2	18	20	30	22	35	30	20	30	10	10	8	6,2	10	10	6,7
	apacity (mAh) Max I	3350	3600	1500	1500	1500	3000	3500	3200	2200	1250	3000	1500	3450	2200	2900	3000	2600	1500	2500	2000	2000	2600	3000	2600	2100	2900	2250	3500	3100	3200	2900	3350
	i nominal voltage (V) nominal c	3,6	3,6	3,6	3,7	3,7	3,6	3,6	3,7	3,6	3,7	3,6	3,7	3,6	3,7	3,7	3,7	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,7	3,6	3,7	3,7
	manufactur model	LG F1L	LG M36	LG HB4	LG HB6	LG HB2	LG HG2	LG M11	LG MH1	LG MF2	SAMSUNG 13L	SAMSUNG 30Q	SAMSUNG 15M	SAMSUNG 35E	SAMSUNG 22P	SAMSUNG 29E	SAMSUNG 30A	SAMSUNG 26J	SAMSUNG 15L	SAMSUNG 25R	SAMSUNG 20S	SAMSUNG 20R	SONY VTC5A	SONY VTC6	SONY VTC5	SONY VTC4	SONY NC1	SONY V3	SONY VTC7	PANASONIC A	PANASONIC BD	PANASONIC PF	PANASONIC B

totale celle

celle serie celle parallelo celle per blocco numero blocchi 16 6 8

Appendice C

Tabella di mooch 2020

18650 Battery Ratings — Based on testing by Mooch Updated September 1, 2020 – Do not share after November 1, 2020

For batteries tested earlier please see my Expired/Outdated Ratings table

This table has the latest test results and updates. Wherever there is a difference between a test report and the table, use this table.

Do not use this table unless you fully understand and agree with everything in the red boxes below

Misusing or mishandling lithium-ion batteries can pose a SERIOUS RISK of personal injury or property damage.

Using a battery at or below its current rating does not mean it is "safe". Because you are using a battery for a purpose it was not intended for there will always be some risk. This risk grows if the battery is misused or mishandled.

You are responsible for your own safety! These batteries are designed and manufactured only for use in a battery pack with the proper physical and electronic protection. They were not designed for yaping (electronic cigarette) use or for use without battery pack protection circuitry. Use of these batteries is AT YOUR OWN RISK!

This table is only meant as a first step in selecting a battery. Do not use it as the only source of information! This is especially true if you intend to use a battery near its continuous current rating. Carefully research any battery you are considering using before purchasing. You are the only one responsible for any damage or injury sustained if you used this table to select a battery.

Only buy batteries from known, well trusted vendors. There are lots of fakes!
 Never use a battery, charger, or device that is not in perfect working order.
 The plastic battery wrap and top insulating ring must always be kept in perfect condition to prevent short-circuiting of the battery which can result in the battery exploding.
 Never exceed the battery's continuous discharge rating (CDR) or charge rating.
 Never use or charge a battery that is more than warm or below freezing.

The table below only notes the estimated ratings for batteries at the time I tested them. For any battery not in a Samsung, Sony, Murata, LG, Panasonic, Sanyo, or Molicel original plastic wrap the battery being used can change at any time! This is one of the hazards of using "rewrapped" batteries. To avoid this issue use genuine Samsung, Sony, Murata, LG, Panasonic, Sanyo, or Molicel batteries in their original plastic wraps.

Using a battery a	t under its continu	ious current rating d	loes not mean it is	s ``safe″!
You must ALWAYS respect	the power these	batteries contain an	d never misuse or	 mishandle them,

All OEM	1 18	650	Batt	eries		New OEM Pathenias Trated sizes July 2010									Ratings			
Tested to Date						Non-OEM Batteries Tested since July 2018									OEM Battery = Original Equipment Manufacturer Battery, one made by a			
						To reduce risk increase performance and extend the We										Major manufacturer like Samsung, Sony, LG, Panasonic, Sanyo, Murata, or Molicel.		
To reduce risk, increase of the battery I rec	ommend	ance, and not exce	extend the	he life	Date	of the battery I recommend not exceeding the (###see the side note)										Wrap mAh = The capacity rating claimed on the wrap of the cell.		
Estimated Continue	ous Disch	harge Rati	ng (CDR)		Originally Tested	Estimated Continue	ous Disci	harge Rati	ing (CDR)				,	Originally	Rated mAh = The capacity rating in the datasheet.		
Battery	Rated mAh	Tested mAh	Rated CDR	Estimated CDR	(mm/dd/yy)	Battery	Wrap mAh	Tested mAh	Wrap Rating	Estimated CDR	Data Sheet	SDS	UN38.3 Safety Report	Other Safety Reports?	(mm/dd/yy)	Tested mAh = The actual capacity delivered in my testing. If the text is white and the background is red that means the datasheet was not sent to where the problem shows a set of the set		
(top contact too easily dented)	2000	2000	UNK	Approx 25A	5/5/19	Ampking	2600	2600	35A	25A	TBD	TBD	TBD	TBD	9/30/18	Wran CDP = The continuous discharge rating (CDP) given by the battery		
LG H26 (DO NOT BUY) (top contact top easily dented)	2600	2600	UNK	Approx	5/6/19	Aspire	3000	2900	35A	20A	TBD	TBD	TBD	TBD	7/20/18	wrapping company or the rating on the wrap.		
LG HB2 (green)	1500	1500	30A	30A	3/20/16	AWT (DO NOT BUY) (Preposterously overrated)	3300	3300	40A	DNB	DNB	DNB	DNB	NO	11/20/18	Rated CDR = The continuous discharge rating (CDR) in the datasheet.		
LG HB4 (brown)	1500	1500	30A	30A	11/24/15	Basen Gold (DO NOT BUY)	2400	2000	25A	DNB	DNB	DNB	DNB	NO	11/3/19	Estimated CDR = The continuous discharge rating (CDR) based on the rating given by the original battery's manufacturer or estimated via my		
LG HB4 (mustard)	1500	1500	30A	30A	4/2/16	(absurdly overrated)	3000	2800	204	204	TRD	TRD	TRD	TRD	8/18/20	testing if it is lower than the datasheet number. If the text is white and the background is red that means the cell's rating was lowered due to missing		
LG HB6 (ivory)	1500	1500	30A	30A	11/23/15	Eizfan Purple-Black	2500	2500	404	204	TBD	TBD	TBD	TBD	11/30/18	datasheet and/or safety documentation.		
LG HB6 (pink)	1500	1500	30A	30A	4/2/16	Golisi Black S26	2600	2550	25A	25A	TBD	TBD	TBD	TBD	7/9/18	* = The manufacturer's continuous current rating for these batteries is 15A. The datasheet for the VTC6 allows temperature-limited operation		
LG HB7	1500	1500	15A	15A	10/21/16	Golisi Black S30	3000	2800	35A	22A	TBD	TBD	TBD	TBD	12/30/18	above the 15A rating though. Never let the battery get hot, above 80°C, if using it at 20A! The Samsung 300 datasheet (Section 7.9) mentions		
LG HD2	2000	2000	25A	25A	3/19/16	Hohm Tech Hohm Life	3077	3077	20.7	20.7	VES	VES	VES	NO	11/14/19	operation at 20A. Never let the battery get above 75°C, its max rated		
LG HD2C	2100	2100	20A	20A	3/30/16	("60W" on the wrap)	3077	3077	20.7	20.7				NO	11/14/15	this is ONLY true if they have not changed what cell they are wrapping!		
LG HD4 (salmon)	2100	2100	UNK	25A	4/28/16	Hohm Tech Hohm Stretch 2	2944	2944	22.1	22.1		YES	YES	NO	11/16/19	** = The first number is the continuous current rating set by the		
LG HE2	2500	2500	20A	20A	12/5/15	Hohm Tech Hohm Work 2	2547	2547	25.3	25.3	TRO	TRD	TRD	TRD	11/6/19	"temperature limited" rating. You can run the battery at this level if you do		
LG HE4	2500	2500	20A	20A	3/6/16	Imren Gold	3000	3000	15A	15A 204	TBD	TRD	TBD	TBD	7/1/18	not let its temperature reach 60°C for the Molicel P26A/P28A and 75°C for the other cells. If this is a Non-OEM battery then this is ONLY true if they		
LG Brown HG2	3000	3000	20A	20A	1/9/18	Imren Gold (DO NOT RUV)	3000	2900	154/	204	TBD	TBD	TBD	160	//3/18	have not changed what cell they are wrapping! However, running a battery this hard results in a lot of voltage sag,		
(QR code on the wrap)	3000	2900	20A	17A	1/5/19	(dangerously overrated)	3500	3000	30A	10A	DNB	DNB	DNB	TBD	6/28/20	increases your risks, and accelerates the aging of the battery.		
LG Blue HG2 ("HG2L")	3000	2900	20A	17A	9/20/19	Juiced	3000	3000	20A	15A/20A **	IGN	RWRP	RWRP	NO	8/19/18	*** = Having all the documents does not mean the battery is "safe"!! It only means it has passed the most basic of safety testing and this is only		
LG MH1	3200	3200	10A	10A	7/11/15	Kdest Orange (K6W)	2400	2400	25A	20A		YES	REO	NO	11/28/19	if the documents I received are genuine. We subject our cells to much more wear and tear than the basic safety testing addresses and we can short		
LG MJ1	3500	3500	10A	10A	11/13/16	klejjs	2600	2600	25A	25A		YES	YES	NO	1/17/20	circuit our cells much harder than the UN38.3 safety testing does.		
Molicel P26A (authorized cells only)	2600	2600	35A	25A/35A **	3/8/19	Lithicore	3500	Not	204	DAUR		1700	VEC		4/25/10	Documentation		
Molicel P28A (authorized cells only)	2800	2700	35A	25A/35A **	4/26/19	document says LiPo)	2500	tested	204	DNB		ЦРО	TES	NO	4/25/19	unknown safety risks when using this battery!		
Murata VTC4	2100	2100	UNK	23A	7/29/18	(DO NOT BUY, safety	3000	Not tested	20A	DNB		LIPO	YES	NO	4/20/19	of specifications/ratings. A missing datasheet means we can only estimate		
Murata VTC5	2600	2600	UNK	20A	8/3/18	Lithicore										battery will last before needing replacing.		
Murata VTC5A	2500	2500	UNK	25A	1/4/19	(DO NOT BUY, safety	3500	Not tested	10A	DNB		LIPO	YES	NO	4/21/19	SDS = Safety Data Sheet (formerly MSDS) or its equivalent. Lists the		
Panasonic NCR18650A	3100	3100	5.9A	5.9A	UNK	Orbtropic ORB-3120	3120	3000	304	154	TBD	TBD	TBD	TBD	3/25/20	chemical composition of the battery and any hazards. Can be used to determine if the battery is LCO chemistry, i.e., if it's a LiPo. A missing SDS		
Panasonic NCR18650B	3200	3200	4.9A	4.9A	11/9/16	OSO White	5110	5000		134	100	100	100	100	3,23,20	means we don't know if this battery is a LiPo or not. I don't request this for rewrapped OEM cells as their battery chemistry is known.		
Panasonic NCR18650BD	3000	3000	104	104	9/6/15	(DO NOT BUY, safety	2600	2500	25A/ 40A	DNB	IGN	LIPO	IGN	NO	7/8/19	UN38.3 Safety Report = The results of the factory's UN38.3 safety testing.		
Panasonic NCR18650GA	3300	3300	104	104	11/14/16	OSO Black										This is a series of basic tests all cells must pass in order to be shipped to customers. A missing safety test report means we don't know if this battery		
Panasonic NCR18650PF	2680	2680	10A	10A	11/12/16	(DO NOT BUY, safety document says LiPo)	3200	3100	10A/ 30A	DNB	IGN	LIPO	IGN	NO	7/10/19	can pass any of the safety tests all of the OEM (Samsung, Sony, LG, etc.) batteries have passed. This is really, REALLY bad! Passing all of these tests		
Samsung 15L	1500	1500	18A	18A	6/23/17	QSO Black	-									does NOT mean the cell is "safe". I don't request this test report for rewrapped OEM cells because they are extensively tested by the		
Samsung 15M	1500	1500	23A	23A	7/22/17	(DO NOT BUY, safety document says LiPo)	3500	3400	12A/ 30A	DNB	IGN	LIPO	IGN	NO	7/11/19	manufacturer.		
Samsung 20Q	2000	2000	15A	15A	5/27/18	Lithium Werks LiFePO4	1100	1100	30A	30A		YES	YES	NO	11/12/19	Other Safety Reports = More rigorous testing such as IEC/EN/UL62133,		
Samsung 20R	2000	2000	22A	22A	2/13/16	Radio Shack	2500	2500	20A	20A	TBD	TBD	TBD	TBD	9/15/18	NO in this column is not a problem as long as the cell has passed UN38.3		
Samsung 20S	2000	2000	UNK	30A	5/21/18	Radio Shack	3000	3000	15A	15A	TBD	TBD	TBD	TBD	10/13/18	cesting.		
Samsung 22P(M)	2050	2050	10A	10A	8/22/17	Vapcell Green	2000	2000	28A	28A	TBD	TBD	TBD	TBD	10/21/18	the batteries I had was too large.		
Samsung 24S	2400	2400	UNK	25A - 30A	5/22/18	Vapcell K25 Red	2500	2500	20A	20A	TBD	TBD	TBD	TBD	4/20/20	DNB = DO NOT BUY. This battery had one or more of the following: secretly		
Samsung Blue 25R (25R2)	2500	2500	20A	20A	6/21/15	Vapcell Green	2600	2600	25A	25A	TBD	TBD	TBD	TBD	9/24/18	switched to a lower amp-rated battery, missing safety documents, fake or falsified document(s), hugely exaggerated ratings, poor performance, and/		
Samsung Green 25R (25R5)	2500	2500	20A	20A	10/11/15	Vapcell K30 Yellow	3000	2900	15A	15A	TBD	TBD	TBD	TBD	4/21/20	or false chemistry and other info. With all the other great choices we have there is no reason to buy this battery.		
Samsung Green 25R (25R6M)	2500	2500	20A	20A	4/24/17	Vapcell P1835A – Protected USB (70mm long)	3500	3400	10A	10A	TBD	TBD	TBD	TBD	6/28/20	DRTD = Derated. The battery wrapping company did not submit a datasheet		
Samsung 25S	2500	2500	25A	25A/35A **	6/17/18	Vapcell F35 Green	3500	3400	10A	10A	TBD	TBD	TBD	TBD	8/25/20	so the current rating was lowered enough to drop the cell temperature by 10°C at its original continuous current rating and the capacity was lowered		
Samsung 26F	2600	2600	5.2A	5.2A	11/6/16	Xtar	2600	2600	35A	25A/35A **		YES	YES	NO	8/1/19	FAKE = The document they sent me was a fake.		
Samsung 30Q	3000	3000	15A	*	1/15/18	For batteries to	eted (arlier	than t	han the	naet fe	w mor	the nu	0360 60	a mv	IGN = Ignored my request for this document.		
Samsung 35E	3500	3500	8A	8A	11/7/16	i or batteries te	8650	Expire	d/Out	dated Ba	atterv	Tests T	able	6436 36	5 my	LIPO = The SDS (safety data sheet) chemical composition table shows that		
Sanyo UR18650NSX	2500	2500	20A	20A	3/24/16			Expire	a out	uniou bi	mory		ubic			this cell uses the same chemistry as a LiPo. This does NOT mean this cell is inherently dangerous! LiPo' as can go into thermal runaway at a lower		
Sony VC7	3500	3500	8A	8A	5/20/18											temperature than other chemistries, and their reaction when in runaway		
Sony VT4	2000	2000	22A	20A	7/17/18											phone, tablet, laptop, many internal battery mods, and many DNA box		
Sony VTC3	1500	1500	30A	28A	3/13/16											nods use LIPo cells. As I recommend with any LIPo, take extra care and do not misuse or mishandle this cell.		
Sony VTC4	2100	2100	30A	23A	3/15/16											REF = Claim they have the document but refused to send it to me.		
Sony VTC5	2600	2600	20A	20A 25A/30A	3/16/16											REQ = I have requested this document.		
Sony VTC5A	2500	2500	30A	**	6/4/16											RWRP = Appears to be a rewrapped OEM cell. Only a datasheet was requested.		
Sony VTC5D	UNK	2700	UNK	25A 15A/ 20A	4/7/18											TBD = To Be Determined. I have not contacted them yet to request the		
Sony VTC6	3000	3000	15A	*	1/14/18											sarety documents. UNK = Unknown		
(pre-production samples)	UNK	3000	UNK	**	1/31/18											WRAP = This was tested earlier but they changed what cell they are using without a change in the wrap. I do not know its ratings now and I will not		

Appendice D

BMS_LTC6813_class[73] void loop()

void loop()

semplified schematic of the loop() function.



Appendice E

BMS_LTC6813_class[73] algoritmo di carica

carica(cell_asic bms_ic[])

inside the object: CELLA



VARIABILES:

Voltage : Voltege of the current cell

low_voltage : lowest voltage between the cells of the pack

Vthreshold : threshold voltage to stop the charge, usually set 4.1V to give a gap for the rest of the battery pack to rise up, and to not involve in a OV_Error

semi_THRESHOLD : a voltage near the OV_Threshold, to not involve in an OV_error, usually set to 4.19V

ΔVoltage & ΔVoltage_final : max voltage difference that we want in uor pack during the first and the last part of the charge

return false

this cell is not completely charge

return true this cell is

Appendice F

BMS_LTC6813_class[73] Schema di inizializzazione degli oggetti

OBJECT INITIALIZE



This is **NOT a block diagram**, BATTERY_PACK is not the father and MODULE does not extend it, that is also true for CELL and NTC. here I'm showing how every object is created.

Only 1 BATTERY_PACK objet is created, it is important because in the main_loop() every method call start from that (pacco.error() etc..), and it call the same method for every MODULE, that obviously calls the proper method in CELL and NTC.

So the algorythm is structured by an itereative method call for every battery pack object, making it a **solid** but most important **modular** code, that is very important for our goals

Appendice G

Schematico ADC - Polimarche Racing Team V1







Appendice H

Schematico SPI-isoSPI converter Polimarche Racing Team V1



Bibliografia

- [1] IEA. Global EV Outlook 2020 (https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020)
- [2] RSE. Gli effetti del lockdown sulla qualità dell'aria a Milano e in Lombardia (https://dossierse.it/05-2020-gli-effetti-del-lockdown-sulla-qualita-dellaria-amilano-e-in-lombardia/)
- [3] RSE. AUTO ELETTRICA E DE-CARBONIZZAZIONE: FACCIAMO CHIAREZZA (https://dossierse.it/11-2019-auto-elettrica-e-de-carbonizzazione-facciamochiarezza/)
- [4] FS Rules 2020 V1.0 (https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf)
- [5] C. C. Chan, "The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," in Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 4, pp. 704-718, April 2007, doi: 10.1109/JPROC.2007.892489.
- [6] engineering.com. Inside the Chevrolet Bolt EV (https://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID /11294/Inside-the-Chevrolet-Bolt-EV.aspx)
- [7] carolinacountry.com. Find Charging Options for Your Electric Vehicle (https://www.carolinacountry.com/your-energy/energytech/know-chargingoptions-to-keep-your-ev-rolling)
- [8] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi (2004) Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. Taylor & Francis, ISBN: 0849331544, 9780849331541

- [9] Minnehan, John J., & Pratt, Joseph William. Practical Application Limits of Fuel Cells and Batteries for Zero Emission Vessels. United States. doi:10.2172/1410178. (https://energy.sandia.gov/wp-content/uploads/2017/12/SAND2017-12665.pdf)
- [10] researchgate.net. Schulz, Martin. (2020). Re: Hydrogen fuel cell vs battery electric cars - Which one will win the battle?. Retrieved from: (https://www.researchgate.net/post/Hydrogen_fuel_cell_vs_battery_electric_cars-Which_one_will_win_the_battle/5f18373e45225907ab647dbf/citation/download)
- [11] energy.gov. How Do All-Electric Cars Work? (https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work
- [12] electricalpowerenergy.com. Things You Need to Know About Three Phase Induction Motors (http://www.electricalpowerenergy.com/2015/04/things-you-need-to-knowabout-three-phase-induction-motors/
- [13] Austin Hughes. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. 1993. ISBN 0750617411 978-0750617413
- [14] newkidscar.com. Permanent magnet synchronous motor construction (https://www.newkidscar.com/electric-car/permanent-magnet-synchronousmotor-construction/
- [15] in-wheel.com. Direct-drive in-wheel motors (elaphe) (https://in-wheel.com/en/solutions-2/direct-drive-in-wheel-motors/
- [16] farelettronica.it. INVERTER E MOTORI AC TRIFASE (https://farelettronica.it/web/inverter-e-motori-ac-trifase/
- [17] evc1000.eu. DIDIMO: dual inverter for automotive applications and preliminary evaluation from a reliability and safety viewpoint (http://www.evc1000.eu/en/file/89
- [18] INTERTEK. Fuel Cells vs Batteries In the Automotive Sector (http://www.intertek.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=48062)
- [19] CHARGED. Tesla's top motor engineer talks about designing a permanent magnet machine for Model 3

(https://chargedevs.com/features/teslas-top-motor-engineer-talks-about-designing-a-permanent-magnet-machine-for-model-3/)

- [20] EVC1000. D2.1-Vehicle and component specifications (http://www.evc1000.eu/en/file/86)
- [21] rs-online.com. rs online store (https://it.rs-online.com/web/)
- [22] technologyreview.com. How Tesla Is Driving Electric Car Innovation (https://www.technologyreview.com/2013/08/07/15498/how-tesla-is-drivingelectric-car-innovation/)
- [23] Liu, K., Li, K., Peng, Q. et al. A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles. Front. Mech. Eng. 14, 47-64 (2019).
- [24] qats.com. Industry Developments in Thermal Management of Electric Vehicle Batteries (https://www.qats.com/cms/category/battery-cooling/)
- [25] st.com. Automotive Battery Management System (BMS) (https://www.st.com/en/applications/electro-mobility/automotive-batterymanagement-system-bms.html)
- [26] J. V. Barreras, C. Pinto, R. de Castro, E. Schaltz, S. J. Andreasen and R. E. Araujo, "Multi-Objective Control of Balancing Systems for Li-Ion Battery Packs: A Paradigm Shift?," 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Coimbra, 2014, pp. 1-7, doi: 10.1109/VPPC.2014.7007107.
- [27] chem.libretexts.org. 19.3: Voltaic (or Galvanic) Cells: Generating Electricity from Spontaneous Chemical Reactions (https://chem.libretexts.org/Courses/Sacramento_City_College/SCC%3A_Che m_400_-_General_Chemistry_I/Text/19%3A_Electrochemistry)
- [28] B. J. Landi, M. J. Ganter, C. D. Cress, R. A. DiLeo and R. P. Raffaelle, Energy Environ. Sci., 2009, 2, 638-654.
- [29] Budde-Meiwes, Heide & Drillkens, Julia & Lunz, Benedikt & Muennix, Jens & Lehner (maiden name Rothgang), Susanne & Kowal, Julia & Sauer, Dirk. (2013). A review of current automotive battery technology and future prospects. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D:

Journal of Automobile Engineering. 227. 761-776. 10.1177/0954407013485567.

- [30] batteryuniversity.com. Learn About Batteries Contents (https://batteryuniversity.com/learn/)
- [31] bcg.com. Batteries for Electric Cars Boston Consulting Group (https://www.bcg.com/documents/file36615.pdf)
- [32] farnell.com. CR-2477/VCN (https://it.farnell.com/panasonic-electronic-components/cr-2477vcn/batteria-litio-cr2477-vert/dp/1892674)
- [33] qspower.com. Deep cycle life more than 2000times prismatic battery cells (https://www.qspower.com/2019/10/23/deep-cycle-life-phosphatelifepo4)prismatic-cell-86ah-100ah-150ah-200ah/)
- [34] Zhang, Ruifeng & Xia, Bizhong & Li, Baohua & Lai, Yongzhi & Zheng, Weiwei & Wang, Huawen & Wang, Wei & Wang, Mingwang. (2018). Study on the Characteristics of a High Capacity Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) Lithium-Ion Battery-An Experimental Investigation. Energies. 11. 2275. 10.3390/en11092275.
- [35] E. Raszmann, K. Baker, Y. Shi and D. Christensen, "Modeling stationary lithium-ion batteries for optimization and predictive control," 2017 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), Champaign, IL, 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/PECI.2017.7935755.
- [36] datasheetspdf.com. ICR18650-22 Datasheet (https://datasheetspdf.com/datasheet/ICR18650-22.html
- [37] Stroe, Daniel-Ioan & Swierczynski, Maciej & Stroe, Ana-Irina & Kær, Søren. (2016). Generalized Characterization Methodology for Performance Modelling of Lithium-Ion Batteries. Batteries. 2. 1-20. 10.3390/batteries2040037.
- [38] D. Cittanti, A. Ferraris, A. Airale, S. Fiorot, S. Scavuzzo and M. Carello, "Modeling Li-ion batteries for automotive application: A trade-off between accuracy and complexity," 2017 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive, Torino, 2017, pp. 1-8, doi: 10.23919/EETA.2017.7993213.
- [39] Yang, Jufeng & Xia, Bing & Shang, Yunlong & Huang, Wenxin & Mi, Chris.

(2016). Improved Battery Parameter Estimation Method Considering Operating Scenarios for HEV/EV Applications. Energies. 10. 5. 10.3390/en10010005.

- [40] iaac.technion.ac.il. Method of Least Squares (http://iaac.technion.ac.il/workshops/2010/KFhandouts/LectKF2.pdf)
- [41] Baccouche, Ines & Jemmali, Sabeur & Mlayah, Asma & Manai, Bilal & ESSOUKRI BEN AMARA, Najoua. (2018). Implementation of an Improved Coulomb-Counting Algorithm Based on a Piecewise SOC-OCV Relationship for SOC Estimation of Li-IonBattery. International Journal of Renewable Energy Research. 8. 178-187.
- [42] Murnane, M., & Ghazel, A. (2017). A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries.
- [43] Unimore, Ing. Luigi Biagiotti. Stima dello stato in presenza di disturbi: il filtro di Kalman (http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti/MaterialeTSC1516/TSC-03-KalmanFilter.pdf)
- [44] Wikipedia. Equazione di Riccati (https://it.wikipedia.org/wiki/Equazione_di_Riccati)
- [45] ce.unipr.it. Filtro di Kalman (http://www.ce.unipr.it/people/medici/geometry/node54.html)
- [46] towardsdatascience.com. The Unscented Kalman Filter: Anything EKF can do I can do it better! (https://towardsdatascience.com/the-unscented-kalman-filter-anything-ekfcan-do-i-can-do-it-better-ce7c773cf88d)
- [47] Zheng, Yongliang & He, Feng & Wang, Wenliang. (2019). A Method to Identify Lithium Battery Parameters and Estimate SOC Based on Different Temperatures and Driving Conditions. Electronics. 8. 1391. 10.3390/electronics8121391.
- [48] Hongxin Li & Cangpu Wu. (1994). ew Algorithm for Parameter Identification Based on the RLS Algorithm. IFAC Proceedings Volumes, Volume 27, Issue 8, Pages 1369-1374, ISSN 1474-6670.
- [49] wikipedia.com. least squares (https://en.wikipedia.org/wiki/Least_squares)

- [50] cse.sc.edu. Thomas F. Edgar. Recursive Least Squares Parameter Estimation for Linear Steady State and Dynamic Models (https://en.wikipedia.org/wiki/Least_squares)
- [51] Sun, Xiangdong & Ji, Jingrun & Ren, Biying & Xie, Chenxue & Yan, Dan. (2019). Adaptive Forgetting Factor Recursive Least Square Algorithm for Online Identification of Equivalent Circuit Model Parameters of a Lithium-Ion Battery. Energies. 12. 2242. 10.3390/en12122242.
- [52] Zheng, Yongliang & He, Feng & Wang, Wenliang. (2019). SOC Estimation of Lithium Battery Based on Dual Adaptive Extended Kalman Filter. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 677. 032077. 10.1088/1757-899X/677/3/032077.
- [53] Xia, Bizhong & Lao, Zizhou & Zhang, Ruifeng & Tian, Yong & Chen, Guanghao & Sun, Zhen & Wang, Wei & Sun, Wei & Lai, Yongzhi & Wang, Mingwang & Wang, Huawen. (2017). Online Parameter Identification and State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Based on Forgetting Factor Recursive Least Squares and Nonlinear Kalman Filter. Energies. 11. 3. 10.3390/en11010003.
- [54] Wang, Tiansi & Pei, Lei & Lu, Rengui & Zhu, Chunbo & Wu, Guoliang. (2015). Online Parameter Identification for Lithium-Ion Cell in Battery Management System. 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2014. 10.1109/VPPC.2014.7007112.
- [55] Kim, Minho & Kim, Kwangrae & Han, Soohee. (2019). Low computational cost method for online parameter identification of Li-ion battery equivalent circuit model in battery management systems using matrix condition number.
- [56] mathworks.com. Matlab (https://www.mathworks.com/products/matlab.html)
- [57] mathworks.com. Simscape (https://www.mathworks.com/products/simscape.html)
- [58] MATT BARHAM. DESIGN AND DEVELOPMENT OF THE ELECTRI-CAL SYSTEMS IN AN ELECTRIC FORMULA SAE RACE CAR (https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/14397)

- [59] optimumg.com. OptimumLap (https://optimumg.com/product/optimumlap/
- [60] formulastudent.de. FSG Magazines 2006 2019 (https://www.formulastudent.de/pr/magazine/
- [61] Sony. US18650VTC5 datasheet (https://www.powerstream.com/p/us18650vtc5-vtc5.pdf)
- [62] lygte-info.dk. Sony US18650VTC5 2600mAh Test (https://lygte-info.dk/review/batteries2012/Sony%20US18650VTC5%202600 mAh%20(Green)%20UK.html)
- [63] e-cigarette-forum.com. mooch 18650 Battery Ratings Table (https://www.e-cigarette-forum.com/blog-entry/18650-battery-ratingstable.7447/)
- [64] arrow.com. homepage (https://www.arrow.com)
- [65] analog.com. ltc6813-1 (https://www.analog.com/en/products/ltc6813-1.html#product-overview)
- [66] analog.com. Low Cost isoSPI Coupling Circuitry for High Voltage High Capacity Battery Systems (https://www.analog.com/en/technical-articles/low-cost-isospi-couplingcircuitry-for-high-voltage-high-capacity-battery-systems.html)
- [67] analog.com. DC2350A-B (https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-andsoftware/evaluation-boards-kits/dc2350a-b.html)
- [68] analog.com. LTC6820 (https://www.analog.com/en/products/ltc6820.html)
- [69] analog.com. DC1941D (https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-andsoftware/evaluation-boards-kits/dc1941d.html#eb-overview)
- [70] analog.com. Linduino (https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-andsoftware/evaluation-development-platforms/linduino.html)

- [71] arduino.cc. arduino-uno-rev3 (https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3)
- [72] enhanceusa.com. Enhance homepage (http://www.enhanceusa.com)
- [73] arcolresistors.com. HS150 ALUMINIUM HOUSED RESISTOR (http://www.arcolresistors.com/resistors/hs150-aluminium-housed-resistor/)
- [74] nkon.nl. 18650 Battery holder with wires (https://eu.nkon.nl/accessories/battery-cases/18650/1x-18650-batterijhoudermet-losse-draden.html)
- [75] the-meiers.org. Download page of CoolTerm (https://freeware.the-meiers.org)
- [76] github.com. BMS_LTC6813_class (https://github.com/mrjacopong/BMS_LTC6813_class)
- [77] github.com. Linduino_LTC6813_class (https://github.com/analogdevicesinc/Linduino)
- [78] github.com. real_time_serial_2_matlab_table (https://github.com/mrjacopong/real_time_serial_2_matlab_table)
- [79] arduino.cc. ARDUINO MEGA 2560 REV3 (https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3)
- [80] st.com. STM32 Nucleo Boards (https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32-nucleo-boards.html)
- [81] espressif.com. esp32 (https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32)
- [82] github.com. arduino-esp32 (https://github.com/espressif/arduino-esp32)
- [83] espressif.com. ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide (https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hwreference/esp32/get-started-devkitc.html)
- [84] Lelie, Markus & Braun, Thomas & Knips, Marcus & Nordmann, Hannes & Ringbeck, Florian & Zappen, Hendrik & Sauer, Dirk. (2018). Battery Management System Hardware Concepts: An Overview. Applied Sciences. 8. 534. 10.3390/app8040534.
- [85] ti.com. Characteristics of Rechargeable Batteries (https://www.ti.com/lit/an/snva533/snva533.pdf)
- [86] bourns.com. PWR221T-30 power resistor (https://www.bourns.com/docs/Product-Datasheets/PWR221T-30.pdf)
- [87] diodes.com. DMP1045U p-mos (https://www.diodes.com/assets/Datasheets/DMP1045U.pdf)
- [88] mouser.it. HM2112ZNLT trasformer (https://www.mouser.it/ProductDetail/Pulse-Electronics/HM2112ZNLT?qs= lYGu3FyN48dcF18eDh4GjA==)
- [89] kicad-pcb.org. KiCad EDA A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite (https://kicad-pcb.org)
- [90] Ziegler, Silvio & Woodward, Robert & Iu, Herbert & Borle, Lawrence. (2009). Current Sensing Techniques: A Review. Sensors Journal, IEEE. 9. 354 - 376. 10.1109/JSEN.2009.2013914.
- [91] lem.com. CAB 500-C/SP5 (https://www.lem.com/en/cab-500csp5)
- [92] tdk.com. B88269X1060C011 (https://product.tdk.com/en/search/sw_piezo/sw_piezo/hvcontactor/info?part_no=B88269X1060C011)
- [93] Karki, A.; Phuyal, S.; Tuladhar, D.; Basnet, S.; Shrestha, B.P. Status of Pure Electric Vehicle Power Train Technology and Future Prospects. Appl. Syst. Innov. 2020, 3, 35.
- [94] amk-group.com. FSE RACING KIT WITH CONTROLLER CARD -R25 (https://amk-group.com/amk-dokucd/dokucd/FSE/en/index.htm#projekt /automotive/html5/fse.htmz#-R25)