



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

Tesi magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

*Studio di un sistema per il monitoraggio della
carica degli accumulatori di un veicolo elettrico*

Relatore: Prof. Manuele Bertoluzzo

Samuel Matrella 1167014

Anno Accademico 2019/2020

Indice

Sommario	5
Abstract	7
1. Introduzione	9
2. BMS	11
2.1 Sicurezza e protezione delle batterie	12
2.1.1 Scarica profonda.....	14
2.1.2 Sovraccaricatura	14
2.1.3 Sovraccorrente in carica o scarica.....	14
2.1.4 Sovratemperatura	15
2.1.5 Cortocircuito interno della cella.....	15
2.1.6 Cortocircuito esterno.....	15
2.1.7 Cortocircuito interno della batteria	15
2.1.8 Incendio.....	16
2.1.9 Elettrocuzione	16
2.2 Bilanciamento.....	16
2.2.1 Bilanciamento passivo	18
2.2.2 Bilanciamento attivo	19
2.3 Stima del SOC	21
2.3.1 Metodi convenzionali.....	24
2.3.2 Algoritmi di filtro adattivo	29
2.3.3 Algoritmi di apprendimento.....	33
2.3.4 Osservatore non lineare.....	36

2.3.5	Altri metodi	37
2.4	Comunicazione	38
2.5	BMS presenti in commercio	41
3.	Progettazione circuito	43
3.1	PSoC 5LP	43
3.2	Caricabatterie.....	50
3.3	Progettazione dell'hardware.....	51
3.4	Programmazione del software	59
3.5	Test effettuati.....	61
4.	Conclusione	65
	Ringraziamenti	67
	Appendice A.....	69
	Bibliografia	75

Sommario

Il mercato dei veicoli elettrici è in continuo sviluppo, spinto dalla necessità di affrontare le gravi conseguenze del riscaldamento globale. In realtà l'interesse per i veicoli elettrici alimentati a batteria non è recente, ma prima la loro diffusione era ostacolata principalmente da un sistema di accumulo che non garantiva un'autonomia comparabile alle auto tradizionali. Al giorno d'oggi invece si può garantire di coprire una maggiore distanza grazie alle moderne batterie agli ioni di litio, ampiamente riconosciute nel mercato globale per la loro elevata densità energetica. D'altro canto però, le loro condizioni operative devono essere mantenute entro limiti imposti per questioni di sicurezza. A questo scopo un sistema per la gestione della batteria (BMS) viene introdotto nel veicolo elettrico. In questa tesi vengono descritte, in prima battuta, tutte le funzionalità presenti nei moderni BMS. Infine, è stato riprodotto un circuito che simula la funzione del monitoraggio della ricarica del sistema di accumulo composto da quattro batterie al piombo acido poste in serie tra loro. Dalla progettazione viene escluso il caricabatterie in quanto era già a disposizione all'interno del laboratorio di Sistemi Elettrici per l'Automazione e la Veicolistica del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova insieme alle batterie. L'elaborato mostra tutte le fasi di progettazione fino ai risultati dei test effettuati.

Abstract

The electric vehicle market is constantly developing, driven by the need to face the serious consequences of global warming. In reality, the interest in battery-powered electric vehicles is not recent, but previously their spread has been slowed down mainly by an accumulation system that did not guarantee an autonomy comparable to traditional cars. Nowadays, however, they guarantee to cover a greater distance thanks to modern lithium-ion batteries, widely recognized in the global market for their high energy density. On the other hand, however, they need to be maintained in specific operating conditions for security reasons. For this purpose, a battery management system (BMS) is introduced in the electric vehicle. In this thesis all the functionalities present in modern BMS are described. Finally, a circuit has been reproduced that simulates the function of monitoring the charging of the storage system consisting of four lead acid batteries placed in series with each other. The charger is excluded from the design as it was already available within the Electric Systems for Automotive and Automation laboratory of the Department of Industrial Engineering of the University of Padua together with batteries. The report shows all the design phases up to the results of the tests carried out.

1. Introduzione

Il progressivo esaurimento globale delle riserve fossili di energia, in concomitanza ad una sempre maggior sensibilità rivolta alle politiche ambientali mirate alla riduzione delle emissioni dei gas serra, ha favorito il continuo sviluppo dei veicoli elettrici (EV).[1] È opinione comune che la diffusione dei veicoli elettrici contribuirà a migliorare la qualità dell'aria nelle nostre città. Tale convinzione si basa sull'assenza di emissioni allo scarico delle auto elettriche. Inoltre, la loro progressiva penetrazione nel mercato automobilistico viene anche considerata uno strumento efficace per la de-carbonizzazione dei trasporti. Le automobili, da sole, sono infatti responsabili di circa il 12% delle emissioni di gas serra dell'Unione Europea. Quindi, ragionando solo in termini di inquinamento locale, non servono analisi quantitative per concludere che i veicoli elettrici sono una soluzione indubbiamente superiore rispetto ai veicoli dotati di motore a combustione interna. È lecito chiedersi tuttavia, se le emissioni legate alla produzione di energia elettrica (principalmente anidride carbonica) per caricare le batterie non siano superiori a quelle causate dalla combustione di diesel o benzina nei motori endotermici tradizionali (considerando anche che nella produzione e distribuzione di carburanti di origine fossile si generano emissioni di gas a effetto serra). Quindi, per una corretta valutazione degli effetti delle auto elettriche sulla riduzione delle emissioni clima-alteranti, bisogna considerare anche le emissioni che avvengono prima dell'utilizzo del veicolo. In altri termini, serve adottare un approccio *well-to-wheel* (dal pozzo alla ruota). Per completare un simile approccio, occorre valutare le emissioni di tutti i gas che contribuiscono al cambiamento climatico, anidride carbonica in primis, ma anche metano e N_2O tra i principali, pesati come anidride carbonica equivalente (CO_2eq). È opportuno quindi adottare un approccio di analisi del ciclo di vita o Life Cycle Assessment (LCA) così come standardizzato dalla norma ISO 14040. In particolare, per quanto riguarda analisi *well-to-wheel*, i risultati di letteratura sono abbastanza uniformi nel confermare che i veicoli elettrici, in ragione anche di una maggiore efficienza, emettono meno CO_2eq dei corrispondenti veicoli a combustione interna. Questo è tanto più vero quanto più alta è la

penetrazione delle fonti rinnovabili e quanto minore è la presenza di carbone nel mix energetico utilizzato per ricaricare la batteria.[2]

Un veicolo elettrico generalmente contiene i seguenti componenti principali: un motore elettrico con il suo azionamento, un sistema energetico di accumulo, un sistema di gestione della batteria (Battery Management System, BMS), un caricabatterie, un sistema di cablaggio, un sistema di frenata rigenerativa, una carrozzeria e un telaio. Il sistema di gestione della batteria è uno dei componenti più importanti, soprattutto quando si usano batterie agli ioni di litio,[3] ed è il principale argomento di questo elaborato che prevede una prima parte descrittiva sulla classificazione dei BMS attualmente presenti in commercio. La seconda metà dello studio riguarda le fasi di progettazione di un circuito che svolge il compito di monitorare la ricarica di una batteria, una delle funzioni cardini di ogni BMS.

2. BMS

I veicoli elettrici alimentati a batteria agli ioni di litio (Li-ion) stanno diventando molto efficaci ed applicabili come alternative per un trasporto più pulito in tutto il mondo.[4] Le batterie agli ioni di litio, a causa della loro grande densità energetica, dell'alta tensione nominale e della mancanza dell'effetto memoria, sono già state comunemente utilizzate per diversi anni in applicazioni portatili.[5] Il BMS è già stato sviluppato e ampiamente utilizzato in moduli elettronici portatili come telefoni cellulari, notebook. Tuttavia, l'implementazione del BMS nei veicoli elettrici è ancora in fase iniziale. Il motivo è che il numero di celle in un veicolo elettrico è cento volte superiore a quello dei dispositivi portatili. Inoltre, i veicoli elettrici sono progettati per fornire elevata potenza, alta tensione e alta corrente, il che rende il BMS più complesso di quello usato nell'elettronica portatile. Può essere costituito da molti componenti come sensori, controller, attuatori che sono controllati da molti modelli, algoritmi e segnali.[6]

A causa della volatilità e dell'infiammabilità, una batteria agli ioni di litio potrebbe prendere fuoco se si sovraccarica. Questo è un problema serio, specialmente nelle applicazioni EV e HEV, poiché un'esplosione potrebbe causare un incidente mortale. Inoltre, l'eccessiva scarica provoca una riduzione della capacità della batteria a causa di reazioni chimiche irreversibili. Pertanto, un sistema di gestione della batteria (BMS) svolge un ruolo vitale nel mantenimento delle migliori prestazioni della batteria e nell'ottimizzazione del funzionamento del veicolo in modo sicuro e affidabile. In altre parole, un BMS completo dovrebbe includere le seguenti funzioni:

- Acquisizione dei dati
- Protezione di sicurezza
- Capacità di determinare e prevedere lo stato della batteria
- Capacità di controllare la carica e la scarica della batteria
- Bilanciamento delle celle costituenti la batteria
- Gestione termica
- Segnalazione dello stato della batteria e autenticazione a un'interfaccia utente
- Comunicazione con tutti i componenti
- Prolungamento della durata della batteria.[7]

Poiché la batteria agli ioni di litio è efficace ed efficiente nel raggiungere prestazioni migliori durante la loro lunga durata, è necessario prestare particolare attenzione alle loro condizioni operative per evitare danni fisici, invecchiamento e instabilità termica. Pertanto, un BMS efficiente deve essere in grado di misurare, stimare e regolare con precisione lo stato di carica (State Of Charge, SOC).[6] I livelli di tensione delle celle costituenti la batteria devono essere monitorati dal BMS per stimare gli stati di carica di ogni singola cella e per proteggerle dal sovraccarico o da un'eccessiva scarica. Il BMS gestisce la ricarica della batteria, in genere si effettua una ricarica CC-CV, cioè una prima

fase a corrente costante fino a 70-80% del SOC, e poi a tensione costante fino a fine carica. Il BMS controlla anche la fase di scarica della batteria in base alla richiesta di carico e alla carica disponibile. Il bilanciamento delle celle della batteria, attraverso tecniche di equalizzazione della carica, dovrebbe essere implementato dal BMS per migliorare le prestazioni complessive e la durata delle batterie. Il controllo della temperatura operativa è necessario per condizionare e gestire il calore per un funzionamento sicuro. Il BMS infine, diagnostica e valuta i guasti che di solito si verificano nei EV in relazione all'intero processo di immagazzinamento dell'energia e di erogazione di energia. Nei prossimi capitoli vengono descritte un po' più nel dettaglio queste principali funzioni.[4]

2.1 Sicurezza e protezione delle batterie

Pacchi di batteria ad alta capacità rappresentano il cuore dei veicoli elettrici o di veicoli ibridi plug-in (PHEV), essendo la loro principale fonte di energia. Ottimizzare la loro capacità e preservare il loro stato di salute (State of Health, SOH), che viene messo a rischio da dei profili di funzionamento sempre più impegnativi, è diventata una delle sfide più avvincenti tra i produttori di automobili. L'ultima tendenza nei veicoli elettrici è quella di aumentare la tensione totale del pacco batteria per fornire la stessa quantità di energia con una corrente ridotta. Questo consente di ridurre il diametro del cablaggio, a causa del ridotto impatto delle perdite ohmiche. Quindi, un numero crescente di celle della batteria viene impilato per costruire generatori di alta tensione. È possibile identificare tre classi di EV / PHEV:

- HV_1: veicoli con tensione batteria inferiore a 250 V;
- HV_2: veicoli con tensione batteria compreso tra 250 V e 500 V;
- HV_3: veicoli con tensione batteria compreso tra 500 V e 800 V.

Ciò consente di costruire pacchi batteria compatti, in grado di immagazzinare diversi kWh in un volume ragionevolmente piccolo, grazie soprattutto alla elevata energia specifica delle celle agli ioni di litio rispetto alle altre tecnologie elettrochimiche. A seconda della classe del veicolo, un diverso numero di celle deve essere monitorato dal sistema di gestione della batteria. Nei veicoli HV_3, il BMS gestisce fino a 240 celle in un normale veicolo passeggeri. Il numero totale di celle può crescere fino a diverse migliaia di celle in veicoli a grande autonomia e veicoli commerciali. Pertanto, un singolo miglioramento in un BMS può produrre un grande vantaggio quando viene esteso su un gran numero di celle.[8]

In una situazione ideale, ogni singola cella del pacco contribuisce ugualmente al sistema, ma in una situazione reale ciò non avviene perché singolarmente non sono tutte uguali. Anche se presentano la stessa composizione chimica, le stesse dimensioni, forma e peso, possono avere capacità totali diverse, velocità di autoscarica diverse, resistenze interne diverse e invecchiamento diverso. Tutto ciò influisce sull'equazione complessiva della durata della batteria, che la ricerca ha dimostrato può essere estesa mediante il bilanciamento delle celle attraverso il sistema di gestione della batteria. Nel caso non ci fosse il bilanciamento, il pacco batteria è limitato nelle prestazioni dalla cella a capacità più bassa poiché una volta esaurita, l'intero pacco si esaurisce più velocemente.

La salute di ogni singola cella nel pacco è determinata in base alla stima del suo stato di carica (SOC), che misura il rapporto tra la carica rimanente e la capacità della cella. Un pacco batteria è composto da più celle in parallelo e in serie per fornire una tensione operativa e una capacità sufficienti a supportare l'applicazione. Tuttavia, se esiste una discrepanza tra la tensione e la capacità delle celle collegate, l'intero gruppo batterie non può funzionare in modo efficiente. Ad esempio, durante la scarica, non appena la prima cella raggiunge la tensione di interruzione, la scarica dell'intero pacco batteria deve essere interrotto e la capacità rimanente nel resto delle celle non può essere utilizzata.

Le batterie subiscono diversi tipi di meccanismi di degradazione per tutta la loro vita. Quando queste batterie vengono ciclate a temperature elevate, si osservano meccanismi di degradazione che portano alla perdita di capacità attraverso l'aumento dell'impedenza dell'elettrodo positivo, specialmente se esso è a basso contenuto di litio. La temperatura di funzionamento, l'uniformità della distribuzione della temperatura, le vibrazioni e l'uniformità della distribuzione delle vibrazioni sono i quattro fattori più importanti. Ciò rende il sistema di gestione termica fondamentale in quanto la capacità utilizzabile e la sicurezza dipendono fortemente dalla temperatura operativa. Al fine di garantire la sicurezza delle batterie, è necessario condurre un corretto bilanciamento delle celle per garantire che l'eccessivo aumento, o la caduta, della temperatura e le vibrazioni possano portare a un degrado irregolare o all'esplosione della batteria. Se la batteria è esposta a condizioni meteorologiche estreme, potrebbe smettere di funzionare, fondersi, creare scintille, creare fiamme, espandersi o addirittura esplodere in casi molto estremi. Le alte temperature hanno un profondo impatto sulle prestazioni, sulla sicurezza e sulla durata della batteria. Sono necessari meccanismi di controllo e monitoraggio della temperatura che possano interrompere la corrente quando la temperatura supera una determinata soglia, altrimenti possono verificarsi perdite di energia attraverso la conduzione, la convezione e la radiazione.[9] Qualunque sia la chimica della batteria, esiste una soglia da cui viene innescata una reazione di fuga termica. Questa reazione indurrà una grande generazione di gas all'interno della cella, che verrà evacuato attraverso uno sfiato specifico o attraverso l'esplosione del contenitore della batteria. Per garantire la sicurezza, è necessario impedire la fuga termica. Un sistema elettronico di gestione della batteria la isola dall'applicazione in caso di emergenza. Il BMS rileva anche qualsiasi evento che

porta al riscaldamento della batteria (sovraccarico, sovracorrente, guasto di isolamento ...). Il paragrafo prosegue elencando i diversi rischi da considerare nella progettazione di una batteria agli ioni di litio e i mezzi di protezione che possono essere compresi nel BMS.

2.1.1 Scarica profonda

La ricarica di una batteria dopo un lungo periodo di conservazione a bassissima tensione può innescare un incendio della batteria. Sono interessate tutte le tecnologie che hanno la grafite come elettrodo negativo, ma quelle con un elettrodo negativo LTO (Litio-Titanato) sono meno sensibili a questo problema. Con il monitoraggio della tensione di ogni cella, il rilevamento di un eventuale raggiungimento della soglia di tensione si può prevenire qualsiasi ricarica dopo una scarica profonda.

2.1.2 Sovraccarica

A differenza delle batterie al piombo acido o NiMH, la batteria agli ioni di litio non può resistere al sovraccarico. Le singole celle possono essere dotate di una protezione da sovraccarico fino a 12V, ma questa protezione non è efficace per i sistemi di batterie ad alta tensione. Il sovraccarico di una batteria attiverà quindi la fuga termica del sistema. Il BMS deve rilevare eventuali sovratensioni di una cella e scollegare la batteria. Per alcune applicazioni, non è sicuro scollegare l'alimentazione senza alcun preavviso. Questo deve essere preso in considerazione nel dimensionamento della batteria.

2.1.3 Sovracorrente in carica o scarica

Durante la ricarica, la sovracorrente porterà alla placcatura di litio sull'elettrodo negativo (le tecnologie LTO sono meno sensibili a riguardo). La ripetizione della sovracorrente in carica creerà quindi dendriti di litio, che potrebbero attraversare infine il separatore e cortocircuitare le celle interessate, portando a una fuga termica. Il BMS deve monitorare la corrente, la temperatura e lo stato di carica della batteria. Nel caso si rilevi un funzionamento al di fuori della zona di sicurezza specificata dal produttore, si deve provvedere con la disconnessione della batteria.

2.1.4 Sovratemperatura

Al di sopra di una temperatura di soglia (da circa 75 a 100 ° C), si verifica una reazione di fuga termica per tutti i tipi di tecnologia agli ioni di litio. Ciò può comportare lo sfiato di un gas infiammabile sotto pressione che può provocare un incendio o un'esplosione della batteria. Il monitoraggio della temperatura della batteria consente di rilevare quando supera la soglia specificata dal produttore e nel caso provvedere con la disconnessione della batteria.

2.1.5 Cortocircuito interno della cella

Durante la produzione di celle agli ioni di litio, vengono ritagliati i collettori in rame e alluminio. In questa fase, le particelle di rame e alluminio potrebbero finire sugli elettrodi di alcune celle. Dopo un certo periodo di utilizzo, queste particelle possono attraversare il separatore e cortocircuitare la cella, portando a una fuga termica della cella. Occorre un design della batteria con la capacità di evacuare il gas di sfiato a causa della fuga termica nella singola cella e nello spazio tra due celle adiacenti.

2.1.6 Cortocircuito esterno

Una cattiva connessione della batteria o un incidente può creare un contatto elettrico tra il polo positivo e negativo del bus-dc. Un cortocircuito di questo tipo può comportare un forte riscaldamento della batteria, con conseguente instabilità termica globale. È necessario scegliere un fusibile correttamente dimensionato per il corto circuito a bassa impedenza e il BMS deve avere la capacità di interrompere la sovracorrente a causa di un corto circuito con impedenza maggiore.

2.1.7 Cortocircuito interno della batteria

Gli urti e le vibrazioni associati all'applicazione, nonché un incidente, possono creare un contatto elettrico tra due parti conduttive all'interno della batteria, causando un cortocircuito interno con le stesse conseguenze della precedente. Il prodotto deve essere progettato per evitare contatti tra parti conduttive e qualsiasi altra parte metallica.

2.1.8 Incendio

Un incendio esterno può aumentare la temperatura della batteria fino alla soglia di fuga termica. Occorre un design della batteria con materiali non infiammabili.

2.1.9 Elettrocuzione

Per batterie con una tensione superiore a 60 V, qualsiasi persona in contatto con parti conduttive sotto tensione è in pericolo di morte. La batteria deve essere progettata per garantire un buon isolamento elettrico. È possibile aggiungere un sistema di controllo dell'isolamento al sistema per monitorare permanentemente la resistenza di isolamento tra i poli della batteria e il telaio.[10]

2.2 Bilanciamento

Nei capitoli precedenti è già stata sottolineata l'importanza nell'avere un bilanciamento nel sistema di accumulo. Si dice che il pacco batteria è bilanciato se tutte le celle sono allo stesso SOC. Esistono due tipi di fattori che influenzano lo squilibrio tra le celle: di tipo intrinseco o estrinseco. I fattori intrinseci sono quei fattori associati ai processi di produzione, che portano alla variazione della quantità di materiale attivo e della resistenza interna (variazione che può variare dall'1% al 10% ad inizio vita, a seconda della qualità di produzione e del livello di selezione applicato per classificare la qualità delle celle [11]); mentre i fattori estrinseci sono quelli che includono il tipo di connessione (in serie e in parallelo), corrente di carica e scarica e calore dissipato. [9]

Nella fase di assemblamento di una batteria composta da più celle, per avere migliori prestazioni tutte le celle devono essere "abbinate". La maggior parte degli standard di sicurezza e di qualificazione della batteria richiedono che una batteria venga costruita utilizzando solo celle abbinate. Le normali operazioni e l'invecchiamento spingono le celle all'interno della batteria verso uno sbilanciamento. Altri fattori possono includere il riscaldamento non uniforme delle celle, i cortocircuiti interni e i caricabatterie difettosi che possono causare il sovraccarico di una o più celle. [12] Inoltre, la ripetizione dei cicli di carica e scarica fa aumentare lo squilibrio della tensione delle celle, il che è

particolarmente dannoso nelle applicazioni EV a causa della dinamica di carica/scarica. Infatti, a differenza delle applicazioni standard in cui le fasi di carica/scarica sono seguite quasi completamente una dopo l'altra, nei EV (ad eccezione di un EV ibrido plug-in), le fasi di carica/scarica sono parziali e intervallate. Ciò è dovuto al fatto che si verifica una scarica durante l'accelerazione e una ricarica durante la frenata. Per tutti i motivi presentati, deve essere adottata una procedura di equalizzazione di carica/scarica in grado di migliorare il mantenimento nel tempo dell'efficienza della cella. La soluzione più semplice dovrebbe essere quella di disconnettere il carico quando una singola cella raggiunge il suo valore massimo/minimo. Sfortunatamente, ciò determina una forte riduzione della capacità del pacco.[5] Per salvaguardare le batterie da questi problemi, il BMS impiega la tecnica di bilanciamento, o di equalizzazione, delle celle per garantire un livello di carica uniforme tra celle diverse dissipando sostanzialmente la carica in eccesso come calore (bilanciamento passivo) o trasferendola alla cella meno carica della batteria (bilanciamento attivo) [9], [4]. Il bilanciamento permette così di garantire che l'energia erogata alle celle durante il processo di carica e l'energia rilasciata durante il processo di scarica siano massimizzate. [9] Tutti i pacchi batteria commerciali includono una qualche forma di bilanciamento delle celle della batteria per questo scopo.[11]

Nel BMS, il bilanciamento funziona in tre modalità, ovvero la modalità di bilanciamento di carica della cella, la modalità di bilanciamento di scarica della cella e la modalità di inattività in cui si controllano i segnali di comando degli interruttori, a causa del fatto che le batterie dei veicoli elettrici non sono solite essere sempre alla loro piena capacità in ogni ciclo di guida e quindi non è necessario mantenere il SOC equilibrato in ogni momento.

Gli algoritmi di bilanciamento sono classificati in base alla tensione e in base allo SOC, e si traducono in metodi di bilanciamento attivi o passivi. [9]

2.2.1 Bilanciamento passivo

Il metodo di bilanciamento passivo è relativamente semplice rispetto quello attivo. In questo metodo, le celle con energia in eccesso vengono scaricate attraverso un percorso di bypass dissipativo sotto forma di calore fino a quando la carica non corrisponde a quella delle altre celle o alla carica di riferimento. La natura dissipativa del bilanciamento passivo significa che non vi è alcuna distribuzione di energia tra le celle. Gli approcci di bilanciamento convenzionali sono passivi, in cui la carica in eccesso di celle con elevato SOC viene dissipata come calore attraverso un resistore (fisso o commutabile), con conseguente riduzione dell'efficienza energetica. Tuttavia, questo metodo è utile per applicazioni di sistema a basso costo in cui non viene utilizzato alcun controllo attivo per equalizzare. Non può essere utilizzato per batterie a base di litio in quanto vi è un alto rischio di esplosione. Il resistore viene posizionato in parallelo a ciascuna cella, controllata dal chip di monitoraggio della tensione della cella, e la dimensione del resistore determina la velocità del bilanciamento. Il circuito di bilanciamento passivo della cella della batteria e il diagramma di flusso sono mostrati rispettivamente in Figura 2.2.1.1. [9]

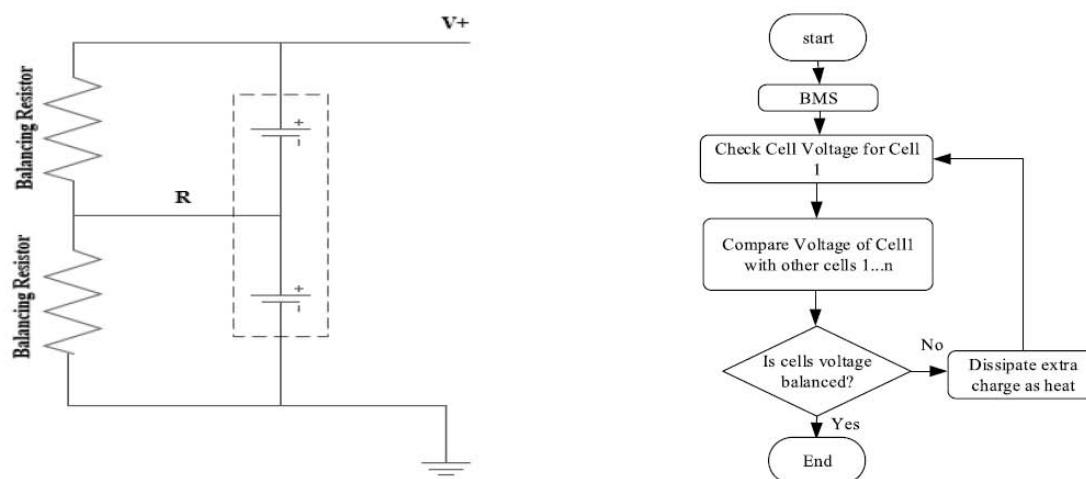


Figura 2.2.1.1 Esempio di un circuito e di un diagramma di flusso per un bilanciamento passivo. [9]

2.2.2 Bilanciamento attivo

L'idea principale dietro tutti gli schemi di bilanciamento attivo è quella di trasferire la carica da celle con SOC più elevato a celle con SOC più basso attraverso condensatori commutati che fungono da banchi di memoria intermedi. La tecnica di bilanciamento attivo massimizza la capacità utilizzabile della batteria assicurando che si sfrutti tutta l'energia immagazzinabile e che si sprechi pochissima energia rispetto al metodo di bilanciamento passivo. Per raggiungere questo obiettivo, un elemento non dissipativo come un condensatore o un induttore viene utilizzato come serbatoio per trasferire energia tra le celle della batteria in ogni circuito di bilanciamento attivo. In questo metodo, il circuito è posto in parallelo con ciascuna cella e bypasserà la corrente solo quando la cella supera la tensione nominale. È l'ideale per applicazioni ad alto ciclo o quando le perdite in stand by devono essere al minimo, tuttavia questo metodo necessita di componenti aggiuntivi che ne aumentano il costo e l'inaffidabilità, nonché lo svantaggio del tempo impiegato dalle celle per essere equalizzate. La Fig. 2.2.2.1 mostra il circuito del modello di bilanciamento attivo.

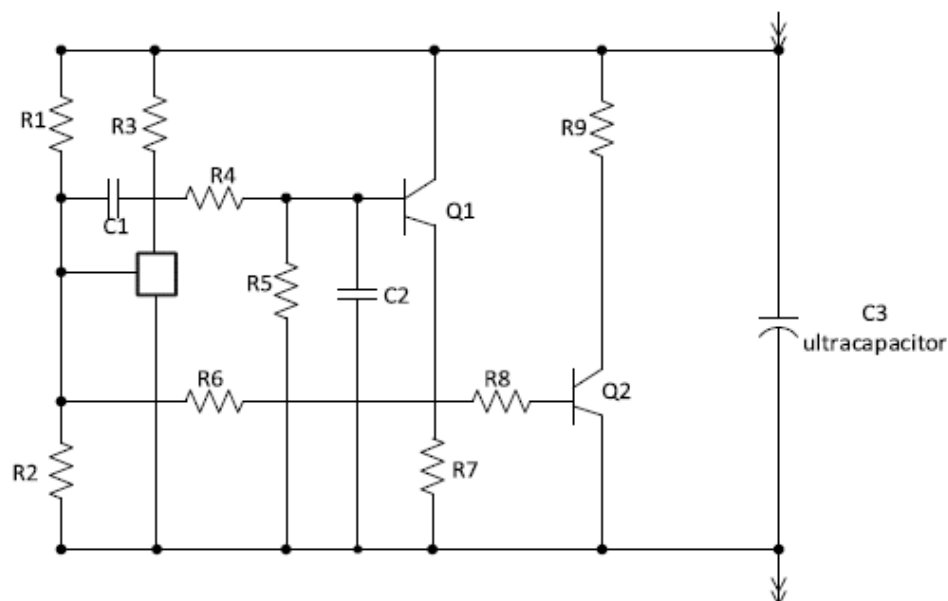


Figura 2.2.2.1 Esempio di circuito per un bilanciamento attivo. [9]

Il metodo di bilanciamento delle celle attivo è costituito da relè, convertitori DC-DC e trasduttori di corrente. Inoltre, questo metodo comprende cinque sottocategorie principali, vale a dire: bypass della cella, da cella a cella, da cella a pacco, da pacco a cella e da cella a pacco a cella.

Bypass della cella: in questo metodo si bypassa la corrente di quelle celle che raggiungono la loro tensione massima/minima, in attesa che anche le celle rimanenti raggiungano la tensione massima/minima. Questi metodi sono facili da implementare, facili da modulare e il loro costo è basso; tuttavia, le loro strategie di controllo esistenti consentono di utilizzarle solo al termine del processo di carica/scarica quando la loro efficienza è bassa.

Metodi da cella a cella: si trasmette l'energia extra di una cella a celle adiacenti con energia immagazzinata più bassa. Possono presentare una maggiore efficienza, ma o la loro velocità è bassa o la complessità del controllo è elevata.

Metodi da cella a pacco: l'energia viene estratta dalla cella più carica del pacco e distribuita equamente a tutte le celle attraverso i terminali del pacco. Questo metodo è sicuro nel senso che nessuna energia viene persa sotto forma di calore poiché la carica aggiuntiva che causerà il riscaldamento viene ugualmente alleviata dalla cella ad altre celle nel pacco.

Metodi da pacco a cella: si trasferisce energia dal pacco alla cella meno carica. Questo metodo garantisce che la carica di equilibrio sia mantenuta per tutto il processo di ricarica e che non si perda alcuna carica.

Metodi da cella a pacco a cella: si trasferisce energia implementando i metodi cella-pacco e pacco-cella.

Nei metodi cella-cella, cella-pacco, pacco-cella e cella-pacco-cella, i circuiti convenzionali sono basati su convertitori DC/DC e tendono ad essere complessi e costosi,

e la loro efficienza può essere bassa. Queste tipologie sono generalmente efficaci nel prevenire il sovraccarico o l'eccessiva scarica delle singole celle della batteria, che è importante per la sicurezza e la longevità del pacco. Di solito, queste architetture di bilanciamento impiegano un trasformatore fly-back o un trasformatore a più avvolgimenti. Questo crea limiti di spazio e di conseguenza limita il numero di celle connesse in serie che possono essere bilanciate usando queste architetture. [9]

2.3 Stima del SOC

In generale, la durata della batteria diminuisce quando viene utilizzata in una vasta gamma di condizioni termiche e cicli frequenti di carica e scarica profonda, in particolare in condizioni di alto impulso di corrente. La stima del SOC con elevata precisione non solo ci fornisce informazioni sulla rimanente energia utile, ma valuta anche l'affidabilità delle batterie. Tuttavia, la misurazione del SOC non è diretta, poiché comporta la misurazione della tensione batteria, della corrente, della temperatura e di altre informazioni relative alla batteria in esame. Pertanto, sono necessari algoritmi accurati per modellare la batteria.

Nei veicoli elettrici, il numero di batterie è collegato in combinazione serie-parallelo per soddisfare il requisito di carico. Come già spiegato nel capitolo del bilanciamento, può capitare che non tutte le batterie raggiungano contemporaneamente la piena tensione durante la carica. Questa condizione provoca uno squilibrio di tensione tra batterie diverse e, di conseguenza, una capacità inferiore dell'intera stringa della batteria. Pertanto, una batteria con SOC al 100% potrebbe non indicare necessariamente il SOC attuale. Pertanto, un calcolo accurato del SOC deve essere accompagnato da un monitoraggio continuo della capacità effettiva della cella. [13]

Diversi metodi per stimare il SOC sono stati introdotti sin dagli anni '80, tuttavia, è ancora necessario trovare una definizione appropriata che spieghi come la comprensione del SOC influisca su alcune funzioni analitiche, come la previsione della vita utile residua e la stima

della capacità. Il metodo più classico per stimare il SOC è l'integrazione della corrente. Si esprime come il rapporto tra la capacità attualmente disponibile e la capacità nominale:

$$SOC = 1 - \frac{\int i \cdot dt}{C_n} \quad (1)$$

dove i è la corrente della batteria; C_n è la capacità nominale; t è il tempo. A causa della variazione del carico esterno e della reazione chimica interna della batteria, la capacità nominale diminuisce gradualmente nel tempo, il che porta a caratteristiche di degradazione della batteria non stazionarie e non lineari. Inoltre, possono verificarsi grandi errori dovuti all'accumulo nelle misurazioni, pertanto è necessario ricalibrare il valore del SOC di volta in volta.

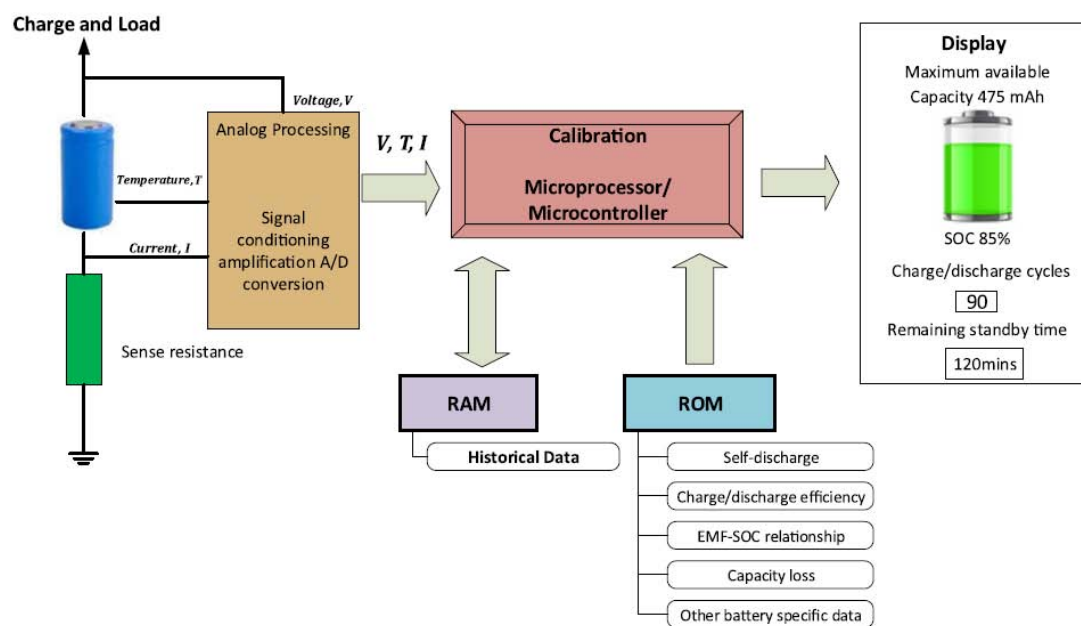


Figura 2.3.1 Architettura generale di un sistema per stimare il SOC.[6]

Un sistema generale per la stima del SOC è mostrato in Figura 2.3.1. Un convertitore analogico/digitale (ADC) viene aggiunto al sistema per convertire i segnali analogici come la tensione, la temperatura e la corrente in segnali digitali. Sulla base dei segnali

misurati, attraverso diversi modelli/algoritmi memorizzati nel microcontrollore/microprocessore si stima il SOC del sistema. In genere, vengono utilizzate due unità di memoria: una di sola lettura (ROM) e l'altra è ad accesso casuale (RAM). I dati di base sono memorizzati nella ROM, come la quantità di scarica e l'efficienza di carica/scarica. La ROM, in alcuni casi, memorizza anche algoritmi per la stima del SOC. I dati storici sono memorizzati nella RAM, come il numero di cicli di carica/scarica. Ogni parametro ha un impatto sull'accuratezza del calcolo. La calibrazione del SOC è necessaria perché la stima si basa sulla misurazione e sull'integrazione della corrente, quindi l'imprecisione della misurazione provoca errori che si accumulano nel tempo.

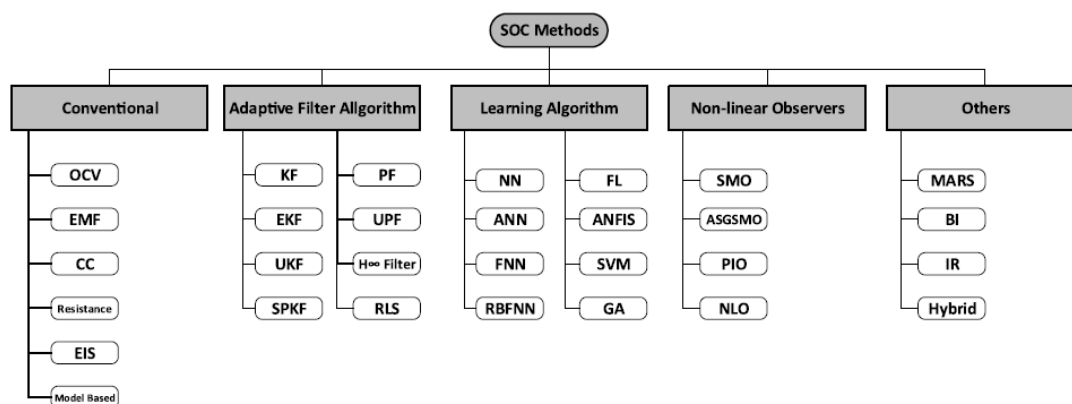


Figura 2.3.2 Classificazione dei metodi di stima del SOC.[6]

Si possono dividere i metodi di stima in cinque categorie, che sono mostrati in Figura 2.3.2. Il **metodo convenzionale** utilizza le proprietà fisiche della batteria, ovvero la tensione, corrente di scarica, resistenza o impedenza. **L'algoritmo di filtro adattivo** utilizza vari modelli e algoritmi per calcolare il SOC. **L'algoritmo di apprendimento** richiede una grande quantità di acquisizione di dati e uno sforzo computazionale pesante per descrivere le caratteristiche non lineari delle batterie. **L'osservatore non lineare** è progettato per gestire il sistema altamente non lineare. Gli altri metodi includono **MARS, BI, IR e metodo ibrido**. MARS, BI e IR utilizzano rispettivamente un modello lineare

esteso, due interpolazioni lineari e un sistema invariante lineare nel tempo. Il metodo ibrido combina due o tre algoritmi SOC per stimare SOC. Sfrutta il vantaggio di ciascun metodo per ottenere prestazioni ottimali, migliorando l'accuratezza della stima.

2.3.1 Metodi convenzionali

2.3.1.1 Metodo di tensione a circuito aperto (OCV)

Poiché il SOC in una batteria agli ioni di litio è collegato alla quantità di materiale attivo incorporato, si può considerare la tensione a circuito aperto per stimare il SOC dopo che la batteria ha sufficientemente riposato raggiungendo l'equilibrio. Di solito, esiste una relazione lineare approssimativa tra SOC e OCV ma non è esattamente la stessa per tutti i tipi di batterie, perché dipende dalla capacità e dal materiale. Ad esempio, una batteria al piombo ha una relazione lineare tra SOC e OCV mentre una batteria agli ioni di litio non mantiene tale relazione. È un metodo semplice e ha un'alta precisione. Tuttavia, il principale svantaggio del metodo OCV è che ci vuole molto tempo di riposo per raggiungere la condizione di equilibrio. Il tempo necessario per passare dallo stato operativo allo stato stabile dipende dagli SOC, dalla temperatura e così via. Ad esempio, a bassa temperatura, una batteria al litio di tipo C/LiFePO₄ impiega più di due ore per raggiungere l'equilibrio. Pertanto, il metodo è applicabile solo quando i veicoli sono collocati in un parcheggio anziché in modalità di guida. Inoltre, sono necessarie attente osservazioni per misurare la tensione di carica e scarica poiché le batterie hanno caratteristiche di isteresi che danno luogo a OCV elevato quando la batteria è carica e OCV basso quando la batteria è scarica, come mostrato in Fig. 2.3.1.1.1.

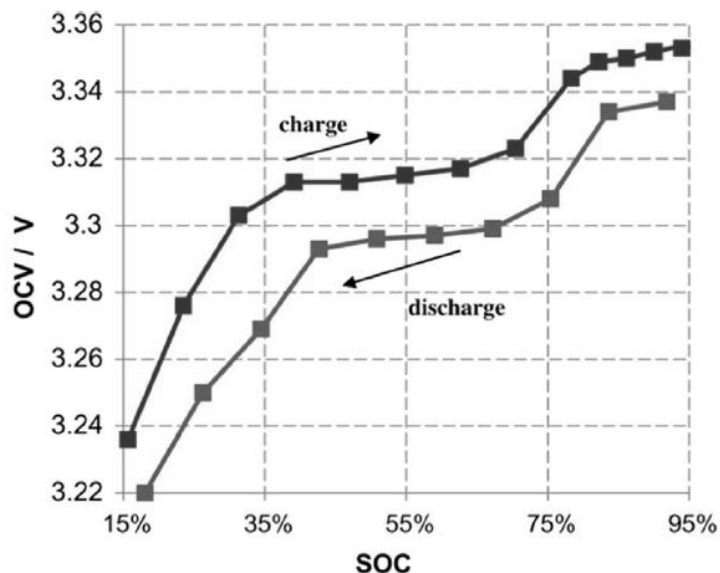


Figura 2.3.1.1.1 Profilo di carica e scarica di una batteria al litio C/LiFePO₄ a 25°C per 3 ore. [6]

2.3.1.2 Metodo della forza elettromotrice (EMF)

La relazione tra la EMF e il SOC è ampiamente utilizzata per la determinazione della capacità della batteria, come mostrato a sinistra nella Figura 2.3.1.2.1. La EMF può essere misurata come equivalente a OCV in condizioni di equilibrio quando il tempo trascorso dopo l'interruzione della corrente è stato abbondante, chiamato "tempo di rilassamento". Diversi ricercatori hanno usato il rilassamento OCV per osservare e prevedere EMF. Il processo di rilassamento dell'OCV si verifica quando la batteria viene caricata e scaricata con frequenti interruzioni di corrente, come mostrato a destra nella Figura 2.3.1.2.1. Il rilassamento dell'OCV può richiedere diverse ore per ridurre l'effetto delle sovratensioni di diffusione. Sono stati sviluppati metodi adattivi per modellare il processo di rilassamento OCV usando EMF e funzioni esponenziali. Lo scopo è osservare il rilassamento OCV quando la corrente viene interrotta ogni volta. Il vantaggio di questo modello è la sua semplicità nel determinare i parametri; tuttavia, prevede in modo impreciso il processo di rilassamento.

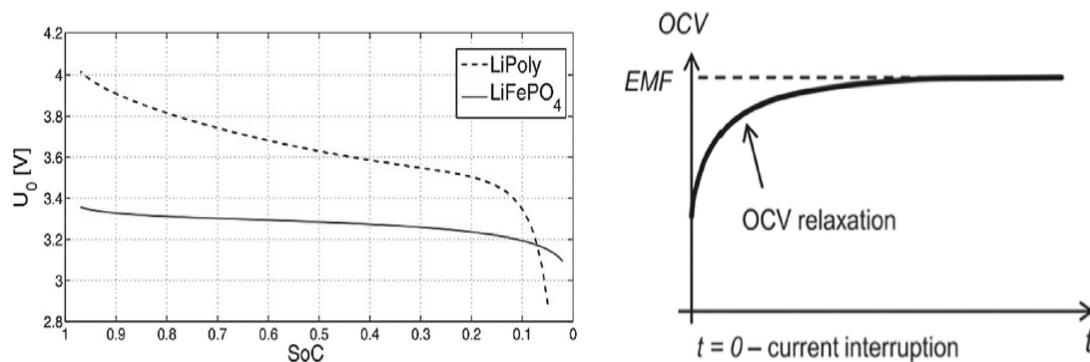


Figura 2.3.1.2.1 EMF (U_o) in funzione del SOC; rilassamento del OCV dopo la scarica e l'apertura. [6]

2.3.1.3 Metodo del conteggio di Coulomb

Questo è il metodo più semplice ed è facile da implementare, con poco sforzo di calcolo. Si basa sull'integrazione della corrente nel tempo mentre la batteria si sta caricando/scaricando. L'espressione matematica per misurare SOC è indicata nella seguente equazione:

$$SOC = 1 - \frac{\int i \cdot \eta \cdot dt}{C_n} \quad (2)$$

dove η è l'efficienza coulombica definita come il rapporto tra l'energia richiesta per la carica e l'energia di scarica necessaria per recuperare la capacità di partenza. Tuttavia, si tratta di un algoritmo a catena aperta e potrebbe provocare inesattezze significative dovute a disturbi e variabili come rumore, temperatura, corrente, ecc. Inoltre, ci sono difficoltà nel determinare il valore iniziale del SOC e questo causa un effetto cumulativo. Inoltre, l'accuratezza della stima dipende fortemente dai sensori utilizzati che possono essere influenzati da errori di misurazione, che comportano anche un effetto cumulativo. Inoltre, il metodo richiede la scarica completa della cella e la calibrazione periodica della capacità, il che riduce la durata della batteria.

2.3.1.4 Metodo della resistenza interna

Questo metodo utilizza la tensione e la corrente della batteria per misurarne la resistenza interna. La tensione viene misurata dalla variazione di corrente durante un breve periodo di tempo (<10 ms). Dal rapporto tra la variazione di tensione e di corrente si ottiene una resistenza, che potrebbe rappresentare la capacità della batteria, in quanto si può ottenere una relazione tra questa resistenza e la capacità. Tuttavia, il valore della resistenza stimata contiene un errore se il tempo è troppo lungo. Questo metodo però ha una buona adattabilità e un'elevata accuratezza solo durante il periodo finale di scarica. Inoltre, a causa del suo valore basso (nel range di milliohm), è molto difficile ottenere un'accuratezza elevata. La resistenza interna cambia leggermente al variare del SOC come si può vedere in Figura 2.3.1.4.1. A causa di questa carenza, la resistenza interna non viene quasi mai utilizzata per stimare il SOC.

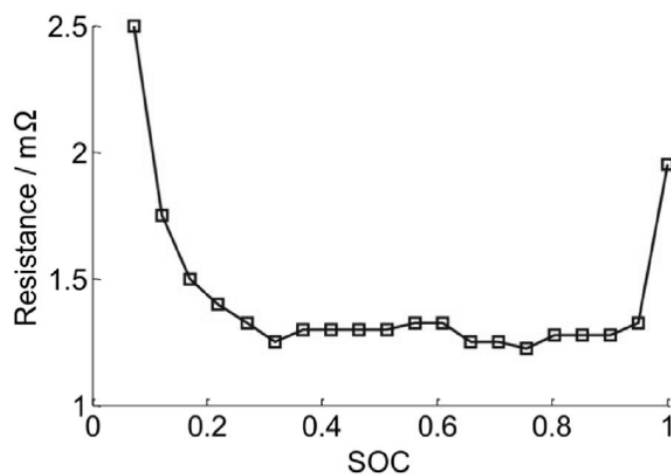


Figura 2.3.1.4.1 Variazione della resistenza interna in funzione del SOC per una batteria agli ioni di litio. [6]

2.3.1.5 Spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS)

EIS è già ampiamente utilizzata al fine di ottenere una comprensione delle reazioni elettrochimiche che si verificano all'interno delle batterie e per la determinazione del SOC. È necessario però un modello elettrochimico della batteria adeguato per poter implementare l'EIS. Si stima l'impedenza della batteria utilizzando induttanze e

condensatori su una vasta gamma di frequenze. Tuttavia, i risultati EIS sono difficili da riprodurre se il sistema non viene utilizzato in condizioni stazionarie. Alcuni ricercatori hanno stimato la EMF della batteria usando l'impedenza, la tensione e la corrente di scarica sotto carico. L'approccio ha un basso costo, raggiunge una buona precisione e può operare online se il valore dell'impedenza viene aggiornato con un valore normalizzato. Tuttavia, l'influenza dell'invecchiamento della batteria e la variazione della temperatura potrebbero far differire i risultati stimati dai valori reali, il che si traduce in una mancanza di precisione.

2.3.1.6 Metodi basati sul modello della batteria

Poiché il metodo OCV non può essere eseguito online e richiede un tempo di riposo sufficiente, quindi non può essere implementato mentre il veicolo è in movimento, è stato necessario sviluppare un modello della batteria. L'uso più frequente di modelli di batterie contiene modelli elettrochimici e modelli di circuiti equivalenti. Il modello elettrochimico della batteria viene spesso utilizzato per l'analisi delle prestazioni della batteria in quanto si riferisce a diversi materiali interni e considera l'effetto dell'elettrodinamica e della termodinamica chimica. Il modello elettrochimico può essere rappresentato come segue:

$$U = U_{OC} - U_R - U_P \quad (3)$$

dove, U è la tensione ai capi della batteria, U_{OC} è la OCV, U_R è la differenza di potenziale attraverso la resistenza, U_P è il potenziale elettrico causato dal processo di polarizzazione. Conoscendo i parametri del modello della batteria, è facile monitorare il SOC della batteria attraverso la tabella OCV-SOC che si ottiene sulla base di risultati sperimentali. Un modello elettrochimico approssimativo per stimare il SOC delle batterie agli ioni di litio potrebbe prendere, ad esempio, in considerazione diversi fattori come la concentrazione di elettroliti, la concentrazione del materiale e la densità microscopica della corrente. Lo svantaggio principale di questo modello è che manca una spiegazione

dettagliata delle reazioni elettrochimiche per una batteria specifica. Il processo è molto complesso e non può essere implementato per tutti i tipi di batteria.

2.3.2 Algoritmi di filtro adattivo

2.3.2.1 Filtro Kalman (KF)

Il filtro Kalman è uno strumento intelligente per stimare dinamicamente lo stato di carica della batteria. È un metodo ben progettato, che filtra i parametri da osservare da incertezze e imprecisioni. È comunemente usato in molte applicazioni come automobili, localizzazione radar, tecnologie aerospaziali e sistemi di localizzazione e navigazione. Negli ultimi anni, l'utilizzo del KF nella stima dello stato della batteria ha avuto molto successo, indipendentemente dal suo elevato costo computazionale. Le caratteristiche più interessanti sono la sua natura autocorrettiva, che consente di tollerare un'elevata variazione di corrente. Il KF è un insieme di equazioni matematiche, che prevede e corregge ripetutamente un nuovo stato mentre il sistema funziona. L'algoritmo fornisce una soluzione ricorsiva attraverso un filtro lineare ottimale per la stima delle variabili di stato. Le equazioni sono gestite secondo il modello di spazio di stato e considerano una dinamica a tempo discreto. Il metodo confronta i dati di input e i dati di output misurati per calcolare la deviazione quadrata media minima dello stato reale. Si presume che il rumore di processo e il rumore di misurazione siano zero, gaussiani e indipendenti l'uno dall'altro. Il modello lineare KF è costituito da un processo (Eq. (4)) che prevede lo stato attuale x_k dallo stato precedente x_{k-1} e da una misura (Eq. (5)) che aggiorna lo stato attuale per convertirlo nel valore reale:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad \text{Equazione di stato} \quad (4)$$

$$y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k \quad \text{Equazione della misura} \quad (5)$$

dove x rappresenta lo stato del sistema, u è l'ingresso di controllo, w è il rumore di funzionamento, y è l'ingresso della misura, v è il rumore della misura, A , B , C e D sono le matrici di covarianza che variano nel tempo e descrivono la dinamica del sistema. Le

equazioni matematiche possono derivare, ad esempio, da un modello RC, e vengono convertite nel sistema di spazio di stato per spiegare le caratteristiche dinamiche di una batteria. Per esempio, l'implementazione del KF potrebbe migliorare l'accuratezza del metodo del conteggio di Coulomb portando l'errore a $\pm 1,76\%$ sulla stima del SOC. I vantaggi dell'utilizzo di KF sono la stima accurata degli stati interessati da disturbi esterni come i rumori governati dalla distribuzione gaussiana. Tuttavia, KF non può essere utilizzato direttamente per la previsione dello stato di un sistema non lineare. Inoltre, richiede calcoli matematici estremamente complessi.

2.3.2.2 Estensione del filtro Kalman (EKF)

EKF è stato usato frequentemente per funzionare in applicazioni non lineari poiché KF non è in grado di gestire le caratteristiche non lineari dei modelli di batteria. EKF utilizza derivate parziali e l'approssimazione della serie Taylor del primo ordine per linearizzare il modello della batteria. Il modello di spazio di stato viene linearizzato in ogni istante, e confronta il valore previsto con la sua tensione misurata per correggere i parametri di stima per l'istante successivo. Tuttavia, potrebbe verificarsi un errore di linearizzazione se il sistema è altamente non lineare poiché, in tal caso, la serie Taylor del primo ordine soffre di una mancanza di precisione. Il funzionamento dettagliato di EKF è illustrato nella Figura 2.3.2.2.1.

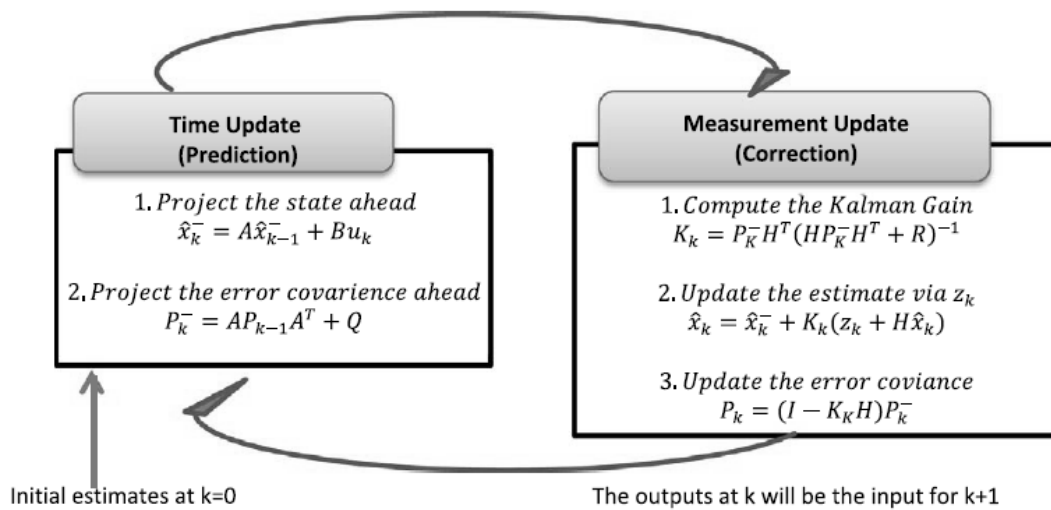


Figura 2.3.2.2.1 Funzionamento del EKF. [6]

Un modello di batteria non lineare può essere costruito utilizzando una tensione a circuito aperto non lineare e un modello RC del secondo ordine collegati in serie, e insieme al EKF può essere utilizzato come esempio per la stima del SOC. EKF verrebbe implementato per ridurre l'effetto del rumore di processo e di misurazione ottenendo risultati più precisi con un SOC iniziale sconosciuto.

2.3.2.3 Filtro Kalman Unscented (UKF)

EKF opera solo nel primo e nel secondo ordine di un modello non lineare e provoca un errore significativo in un modello di spazio di stato altamente non lineare, quindi in questi casi viene utilizzato l'algoritmo UKF che è una versione aggiornata di KF. Si applica un algoritmo di filtraggio a tempo discreto e la trasformazione *unscented*. Una serie di punti chiamati *sigma points* vengono utilizzati per rappresentare la media e la covarianza della distribuzione degli stati. La caratteristica interessante di questo algoritmo è che la matrice jacobiana non è richiesta per il calcolo e il rumore non è necessario che sia gaussiano perché le batterie funzionano in uno stato altamente non lineare e le proprietà del rumore sono generalmente sconosciute. L'accuratezza del UKF è migliore di EKF in quanto prevede accuratamente gli stati del sistema fino al terzo ordine di qualsiasi sistema non

lineare. Tuttavia, il metodo soffre di scarsa robustezza a causa dell'incertezza nella modellazione e dei disturbi nel sistema. Per esempio, con i metodi della tensione della batteria e del conteggio di Coulomb, UKF potrebbe essere utilizzato per regolare automaticamente i parametri del modello per ridurre l'errore sul SOC che può essere causato dal cambiamento delle situazioni ambientali e dall'autoscarica della batteria.

2.3.2.4 Filtro Kalman Sigma Point (SPKF)

SPKF è un altro metodo alternativo per la valutazione degli stati di un sistema non lineare e ottiene risultati più accurati del EKF in termini di media e covarianza utilizzando un numero limitato di funzioni. L'algoritmo seleziona un'insiemi di punti *sigma*, proprio come nel UKF. I vantaggi dell'utilizzo di questo modello sono che ha la stessa complessità di calcolo del EKF e non utilizza le matrici jacobiane. Inoltre, il modello non ha bisogno di calcolare le derivate e la funzione originale. I risultati sperimentali indicano che SPKF migliora l'accuratezza della stima del SOC considerando l'effetto dell'accuratezza e della robustezza del monitoraggio della batteria. SPKF offre anche stabilità nei calcoli numerici poiché non ha bisogno di calcolare le matrici jacobiane.

2.3.2.5 Particle Filter (PF)

L'algoritmo PF viene utilizzato per la stima degli stati, che approssima la funzione di densità di probabilità di un sistema non lineare applicando la tecnica di simulazione Monte Carlo con un insieme di particelle casuali e una distribuzione non gaussiana. Lo strumento di simulazione Monte Carlo può essere applicato per sviluppare un modello stocastico che tiene traccia correttamente del SOC, con l'effetto isteresi che può essere ignorato. Per esempio, il modello di processo (Eq. 4) potrebbe descrivere in che modo il valore del SOC vari al variare della corrente di scarica mentre il modello di misurazione (Eq. 5) potrebbe rappresentare il modo in cui la tensione ai capi della batteria vari con il SOC, con la temperatura e la corrente di scarica. In tal caso si è dimostrato che l'algoritmo proposto è molto efficiente, in quanto il suo tempo di calcolo è sei volte più veloce rispetto a EKF.

2.3.2.6 Filtro H ∞

Il filtro H considera i parametri della batteria che variano nel tempo e non è necessario conoscere le specifiche del rumore di processo e le caratteristiche del rumore di misurazione. È un modello di semplice progettazione, che ha una forte robustezza per funzionare in determinate condizioni. Tuttavia, l'invecchiamento, l'isteresi e gli effetti della temperatura potrebbero deviare dall'accuratezza del modello.

2.3.2.7 Metodo ricorsivo dei minimi quadrati (RLS)

Recursive Least Square (RLS) è un altro strumento efficace che viene utilizzato nel caso di un sistema variabile nel tempo. L'algoritmo calibra, prevede i parametri di un modello dinamico adattivo di una batteria con il fattore di dimenticanza.

2.3.3 Algoritmi di apprendimento

2.3.3.1 Rete Neutrale (NN)

La rete neurale (NN) è uno strumento matematico intelligente, che ha le capacità di adattamento e di autoapprendimento per risolvere un modello non lineare complesso. NN utilizza i dati appresi per stimare il SOC senza conoscere le informazioni sulla struttura interna della batteria e sul SOC iniziale. Vengono usati almeno tre livelli per la formazione di una NN: uno di input, uno di output e uno o più livelli nascosti, come mostrato nella Figura 2.3.3.1.1.

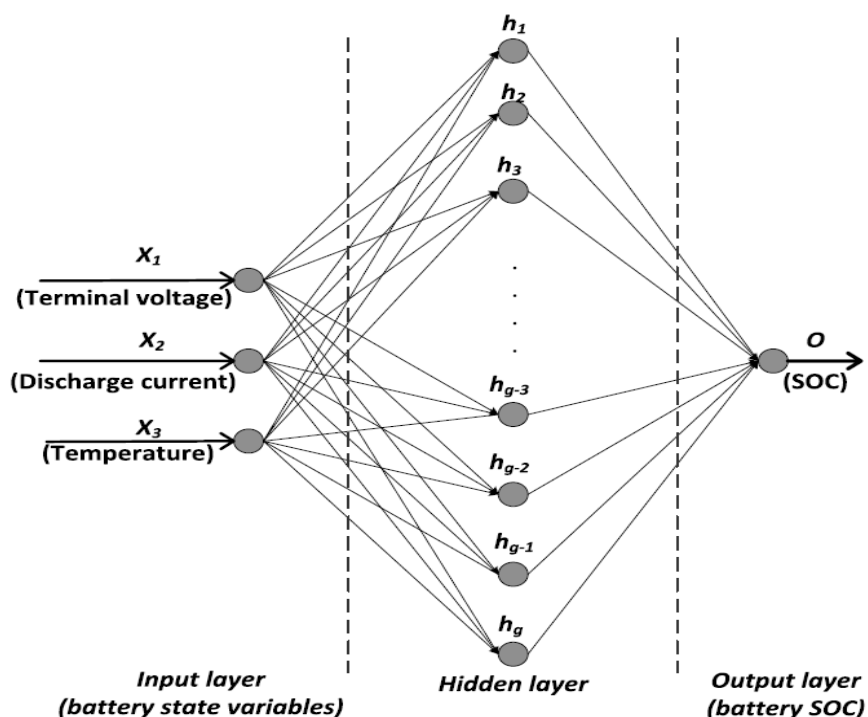


Figura 2.3.3.1.1 Struttura completa di una Rete Neurale per la stima del SOC. [6]

Per le batterie al litio del tipo LiFePO_4 si utilizzano: la corrente di scarica, la tensione e la temperatura come input e SOC come output per costruire la struttura della NN. Il vantaggio di questo metodo è che è in grado di funzionare in condizioni non lineari della batteria mentre si sta caricando/scaricando. Tuttavia, l'algoritmo deve archiviare una grande quantità di dati per l'apprendimento il che, non solo richiede una grande memoria, ma sovraccarica l'intero sistema. Questo metodo combinato ad un modello di batteria basato sul EKF che consideri l'effetto dell'isteresi del OCV, è stato dimostrato che offre ottime prestazioni nella stima, raggiungendo un errore inferiore all'1.

2.3.3.2 Fuzzy Logic (FL)

FL è un altro potente algoritmo per affrontare un modello complesso e non lineare con l'aiuto di un insieme di dati appresi. L'implementazione di FL è divisa in quattro parti, che includono una relazione tra input-output, una funzione di appartenenza per input e per

output, un'applicazione delle regole e una defuzzificazione degli output. Sebbene FL abbia una potente funzione per prevedere un modello non lineare, richiede una grande unità di memoria e calcoli complessi, nonché un'unità di elaborazione costosa. Un esempio di applicazione del FL per stimare il SOC, si potrebbe ottenere utilizzando i dati del metodo di conteggio di Coulomb e del metodo EIS. Si avrebbero tre input (le impedenze monitorate a frequenze diverse) e il SOC come output. Il modello proposto prevede il SOC con un errore massimo del $\pm 5\%$.

2.3.3.3 Support Vector Machine (SVM)

SVM si basa sulla funzione *kernel* e utilizza l'algoritmo di regressione per trasformare un modello non lineare con poche dimensioni in un modello lineare con tante dimensioni. Con l'aiuto della mappatura non lineare β , il modello mappa i dati di input x in uno spazio multidimensionale. Ad esempio, le equazioni di SVM si possono esprimere con un campione di N punti $\{x_k, y_k\}$ dove il vettore di input è $x_k \in \mathbb{R}^n$ e il vettore di output è $y_k \in \mathbb{R}^n$

$$y = \alpha^T * \beta(x) + s \quad (6)$$

dove α è il vettore di peso la cui dimensione è uguale allo spazio del kernel, $\beta(x)$ è una mappatura allo spazio dimensionale; s è l'espressione della parzialità. Il vantaggio di questo metodo è che si comporta bene in modelli non lineari e di dimensioni elevate con una capacità di prevedere il SOC in modo rapido e preciso utilizzando i giusti dati di apprendimento. Tuttavia, il modello contiene un calcolo molto complesso.

2.3.3.4 Algoritmo Genetico (GA)

L'algoritmo genetico (GA) è stato applicato con successo in ingegneria, fisica, matematica per identificare i parametri ottimali di un sistema non lineare. La funzione di base è trasformare i parametri nel modo più efficace per migliorare l'efficienza del sistema. Per esempio, si potrebbe utilizzare in combinazione a un modello di batteria di tipo RC del primo ordine e al modello del conteggio di Coulomb, dove GA ottimizzerebbe i parametri della batteria. È stato dimostrato che si potrebbe ottenere un errore inferiore al 1%.

2.3.4 Osservatore non lineare

2.3.4.1 Sliding Mode Observer (SMO)

SMO ha migliorato il controllo per garantire stabilità e robustezza del sistema contro i disturbi ambientali e le incertezze del modello. Il modello viene stabilito usando l'equazione di stato che viene scomposta nelle equazioni di osservatore nella fase successiva. Un guadagno commutabile del feedback viene progettato per controllare il regime di scorrimento per garantire le caratteristiche di robustezza. Si potrebbe sviluppare un metodo di stima SOC basato su SMO per compensare le caratteristiche dinamiche non lineari della batteria utilizzando un semplice circuito RC.

2.3.4.2 Proportional-Intergal Observer (PIO)

PIO è un metodo di controllo efficiente, che è stato ampiamente applicato in sostituzione del sistema di controllo del feedback (SMO). La funzione di questo controllore è di far convergere la tensione stimata in quella misurata in modo preciso e rapido. Ad esempio, si può stabilire la matrice di osservabilità del modello della batteria per ricostruire le variabili di stato, il modello della batteria si potrebbe identificare dal rapporto SOC-OCV usando un banco di prova. Il vantaggio di questo modello è che stima accuratamente il SOC con meno tempo di calcolo. Inoltre, la robustezza del modello è migliorata.

2.3.4.3 Osservatori non lineari (NLO)

In genere, viene usato comunemente l'osservatore lineare nonostante aumenti l'errore della stima del SOC. Viene invece utilizzato l'osservatore non lineare in un sistema lineare implementato con equazioni di osservazione non lineari. Un metodo di stima del SOC basato su NLO si otterrebbe utilizzando un circuito equivalente RC del primo ordine e con il metodo OCV, usando le equazioni dello spazio degli stati e il polinomio del nono ordine. È stato dimostrato che le prestazioni del metodo proposto sono migliori del EKF e SMO in termini di precisione, velocità di convergenza e costi di calcolo. Inoltre, ha migliorato la robustezza contro i disturbi. Tuttavia, trovare una matrice di guadagno adeguata a ridurre l'errore è un compito difficile.

2.3.5 Altri metodi

2.3.5.1 MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines)

MARS può essere utilizzato per l'estensione di un modello lineare, che può costruire automaticamente un modello non lineare e interagire con le variabili con l'aiuto di un algoritmo di regressione non parametrico. Il modello è costituito da una variabile dipendente \vec{y} e dalle funzioni base M

$$\hat{\vec{y}} = \widehat{f_M}(\vec{x}) = c_0 + \sum_{m=1}^M c_m B_m(\vec{x}) \quad (7)$$

dove \vec{y} sono le variabili dipendenti, c_0 è costante, $B_m(\vec{x})$ è la funzione m -esima base, c_m è il coefficiente della funzione m -esima base. Il modello proposto prevede due fasi: selezione in avanti e cancellazione indietro. All'inizio della fase di selezione, il MARS aggiunge continuamente la funzione base per ottenere il massimo declino dell'errore residuo della somma dei quadrati. Alla fine di questa fase, viene stabilito un modello di grandi dimensioni che si adatta ai dati. All'inizio della fase di eliminazione all'indietro, l'algoritmo elimina i termini del modello uno alla volta fino a trovare il modello efficace migliore. Al termine di questa fase, viene selezionato un modello in base al valore di convalida incrociata generalizzata più bassa (GCV).

2.3.5.2 Interpolazione lineare (BI)

La stima del SOC basata sull'interpolazione lineare può essere eseguita utilizzando le caratteristiche di carica e scarica della batteria. L'algoritmo è valido fino a quando le correnti di carica e scarica rimangono invariate rispetto al valore noto di SOC. Tuttavia, le correnti di carica e scarica non rimangono stabili poiché le correnti della batteria sono fortemente correlate alla capacità della batteria e a fattori esterni. Pertanto, la stima del SOC che utilizza l'interpolazione lineare per la corrente costante non è favorevole per l'applicazione in EV online. Per affrontare questo problema, è possibile utilizzare un'interpolazione bi-lineare a diversi valori della corrente, che consiste nell'estensione di due interpolazioni lineari.

2.3.5.2 Impulse Response (IR)

IR viene applicato per determinare l'uscita di un sistema lineare invariante nel tempo (LTI). La convoluzione dell'ingresso con l'IR definisce l'output del sistema, che è espressa matematicamente

$$y[k] = x[k] * h[k] \quad (8)$$

dove $y[k]$ rappresenta l'output, $x[k]$ l'input e $h[k]$ la risposta all'impulso. Per ottenere risultati precisi, viene selezionato un impulso di corrente stretto in modo tale che la durata dell'impulso sia sufficientemente piccola rispetto alla costante di tempo più breve del sistema. Viene fatto un compromesso tra i tempi della risposta all'impulso e la massima ampiezza della forma d'onda a causa dell'alta costante di tempo delle batterie.

2.3.5.4 Metodo ibrido

Un metodo ibrido è costituito da due o tre algoritmi, che migliorano l'efficienza e la precisione del modello di una batteria. Il metodo non solo consente di ottenere risultati efficaci e affidabili, ma riduce anche i costi del sistema di gestione della batteria. Tuttavia, il metodo ha calcoli matematici molto complessi, che richiedono un dispositivo di memoria di grandi dimensioni. Ad esempio, si potrebbe fare prima una stima con il metodo del conteggio di Coulomb e il metodo OCV, poi applicare il metodo KF per migliorarne l'accuratezza.[6]

2.4 Comunicazione

La funzione di comunicazione di un BMS può essere fornita attraverso un collegamento di dati utilizzato per monitorare le prestazioni, registrare i dati, fornire diagnostica o impostare i parametri di sistema. La funzione può anche essere fornita da un canale di comunicazione che trasporta segnali di controllo del sistema. La scelta del protocollo di comunicazione non è determinata dalla batteria ma è determinato dall'applicazione della batteria. I BMS utilizzati nei veicoli elettrici devono comunicare con il controllore centrale del veicolo e il controllore del motore per garantirne il corretto funzionamento. Esistono

due protocolli principali utilizzati dal BMS per comunicare con il veicolo: attraverso un data-bus o con un bus di tipo CAN (controller area network). I data-bus includono la connessione RS232 e RS485. Lo standard industriale per le comunicazioni a bordo dei veicoli è il bus CAN, che viene più comunemente utilizzato nelle applicazioni dei veicoli.[3]

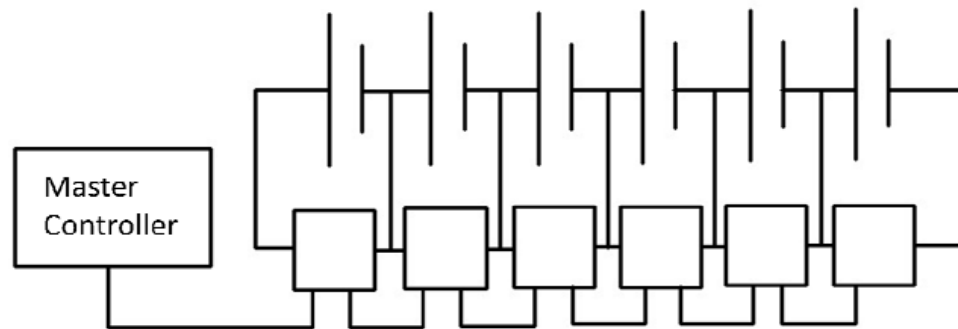


Figura 2.4.1 Esempio di BMS distribuito. [3]

Il BMS può essere progettato in tre diversi modi, a seconda dei requisiti di sistema, flessibilità e ottimizzazione dei costi. Facendo riferimento alle figure 2.4.1 e 2.4.2, un BMS distribuito e uno modulare seguono un approccio compatibile con diverse classi di batterie che vanno da HV_1 a HV_3. In un BMS distribuito ogni unità elettronica di controllo (ECU) *slave* presenta un numero limitato di connessioni di ingresso, gestendo così o una singola cella (di tipo distribuito) o un partizionamento del pacco batteria totale (di solito da 6 a 28 celle, nel caso di BMS modulare). Ciascuna ECU è riferita a una tensione fluttuante corrispondente al terminale negativo della prima cella nel proprio sottoinsieme e invia i propri dati in un controllore *master*. Essendo tutti i moduli *slave* separati galvanicamente, non è possibile che avvenga alcun trasferimento di energia tra di loro. I vantaggi di queste configurazioni includono la sua semplicità e un'elevata

affidabilità. Lo svantaggio principale invece, è la necessità di un gran numero di circuiti *slave* e, in alcuni casi, si può avere difficoltà nel montarli su determinati tipi di celle.

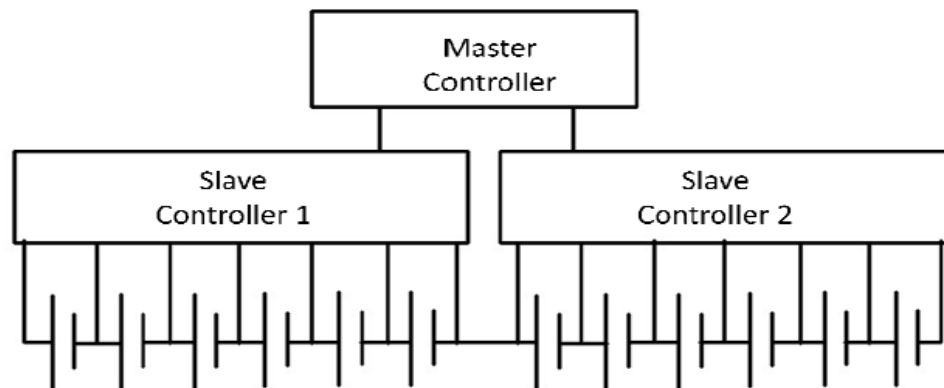


Figura 2.4.2 Esempio di BMS modulare. [3]

Un BMS centralizzato (come mostrato in Figura 2.4.3) è una soluzione personalizzata specifica per l'applicazione, adattata a una specifica classe di batterie con un numero ben definito di celle. Tale strategia di progettazione viene spesso scelta quando l'applicazione ha raggiunto un buon livello di maturità. I componenti sono completamente ottimizzati per garantire le migliori prestazioni utilizzando solo il set minimo di componenti necessari. Un'unità di controllo principale è direttamente collegata a ciascuna cella del pacco batteria e protegge e bilancia tutte le celle fornendo al contempo altre funzioni. Si potrebbe generare del calore in eccesso perché il controller è l'unica fonte per il bilanciamento delle celle. Inoltre, le celle sono distribuite in varie posizioni del veicolo, il che richiede una posizione centrale. Per ridurre le dimensioni del cablaggio, ogni BMIC (Battery Management Integrated Circuit) condivide il proprio terminale di riferimento di terra con il terminale di alimentazione positiva della cella adiacente. D'altra parte, tale scelta implica la rinuncia all'isolamento galvanico tra ciascun BMIC.[8], [3]

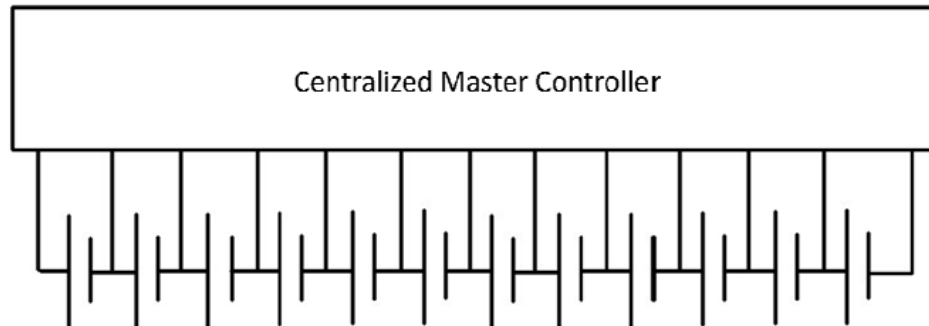


Figura 2.4.3 Esempio di BMS centralizzato. [3]

2.5 BMS presenti in commercio

Attualmente, il BMS è stato ampiamente utilizzato da varie case automobilistiche, college e università. Sono stati sviluppati da alcune società come American Elithion Corporation, Australian EV power, British REAPSystem, Beijing Key Power Technology, Harbin Guantuo Power Equipment Co. Ltd, Huizhou Epower Electronic Co. Ltd, ecc.[6] Gli attuali BMS commercializzati svolgono le funzioni di base ma, in alcuni casi, presentano ancora i seguenti problemi:

(1) Funzione di registrazione dei dati limitata. La funzione di registrazione dei dati svolge un ruolo importante nella creazione del database, che memorizza il profilo di guida che può aiutare a creare e aggiornare il modello per stimare il SOC.

(2) Mancanza della stima dello stato di salute (SOH) e stato di vita (SOL). SOH e SOL sono utilizzati per caratterizzare lo stato di salute attuale e le prestazioni rimanenti della batteria che garantiranno un funzionamento affidabile del veicolo e la manutenzione programmata della batteria, compresa l'eventualità di sostituirla.

(3) Gli attuali BMS non sono intercambiabili tra loro perché ognuno ha il proprio schema di bilanciamento e/o meccanismo di comunicazione e così via.[7]

3. Progettazione circuito

Il progetto consiste nello sviluppare un circuito che potesse costituire un primo stadio per l'assemblamento di un BMS. In particolare, ci si è posti l'obiettivo di costruire e progettare quella parte di circuito che svolge la funzione di acquisizione e monitoraggio della tensione e della corrente di un pacco batteria, composto da quattro batterie al piombo acido disposte in serie. Infatti, la prima fase del progetto ha previsto una preliminare analisi e sperimentazione delle funzioni basilari della scheda PSoC 5LP della Cypress, già presente nel laboratorio di Sistemi Elettrici per l'Automazione e la Veicolistica insieme alle batterie e al caricabatterie. Successivamente sono stati selezionati i componenti necessari al completamento del circuito e sono stati effettuati i test di monitoraggio. Di seguito viene riportata una breve descrizione delle componenti utilizzate e le fasi di progettazione fino alle prove finali.

3.1 PSoC 5LP

PSoC è una linea di prodotti della Cypress Semiconductor che fornisce all'utilizzatore un sistema per sviluppare il proprio progetto nel modo più flessibile possibile. Trattandosi di un System On Chip (SOC) oltre al modulo della CPU (Central Processing Unit), e alle funzionalità comuni ad ogni microcontrollore, integra al suo interno alcune periferiche analogiche e digitali, programmabili attraverso un linguaggio grafico molto semplice da capire anche da utenti che non hanno un background di progettazione di circuiti analogici e digitali.[14]

Nello specifico, si tratta del CY8CKIT-059 PSoC 5LP Prototyping Kit che è costituito da due moduli separabili: il microcontrollore Target ed il KitProg:

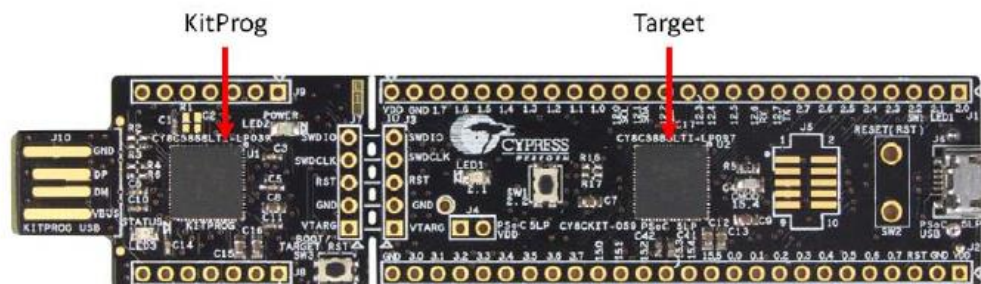


Figura 3.1.1 CY8CKIT-059 PSoC 5LP Prototyping Kit.[15]

Il KitProg è un modulo fondamentale perché permette di eseguire la programmazione del microprocessore Target e il debug del codice. Il KitProg inoltre, fornisce un'interfaccia USB- UART e USB-I2C tra i due moduli, le cui linee dedicate alla comunicazione, sono collegate a specifici pin del microcontrollore Target: ad esempio, UART_RX e UART_TX, le linee dedicate alla trasmissione e ricezione dati del protocollo UART, sono collegate rispettivamente ai pin $P12[6]$ e $P12[7]$. Questa funzione è utile per inviare e ricevere dati tra il dispositivo Cypress e il PC collegandolo semplicemente dalla porta USB.[15],[16]

Il microcontrollore Target è costituito dal microprocessore ARM-Cortex M3, che gestisce le periferiche software e hardware come ad esempio: il pulsante e il led programmabili, l'ingresso Micro-USB, e i due *Expansion Header*, costituiti da 26 I/O pin ciascuno. Questi ultimi, supportano tutte le porte disponibili: GND, VDD, connessioni a elementi passivi e dispositivi di input dell'utente. Sono distanziati tra loro di 100 mm, quindi si possono saldare i connettori per collegare la scheda target a qualsiasi breadboard.

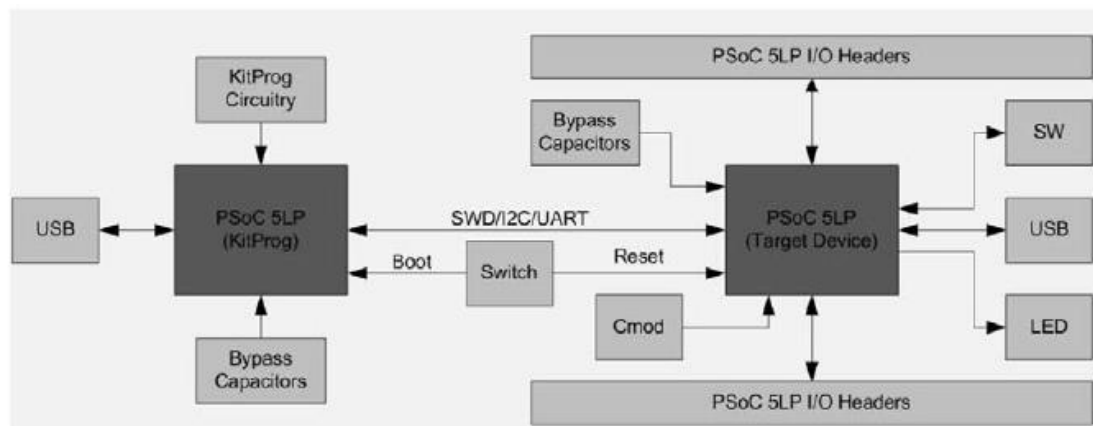


Figura 3.1.2 Diagramma a blocchi del PSoC 5LP Prototyping Kit.[15]

Questa scheda offre diverse possibilità di alimentazione. Per la maggior parte delle applicazioni, è possibile utilizzare l'alimentazione a 5 V dalla connessione USB dal lato KitProg per alimentare l'intero sistema. È inoltre possibile collegare un alimentatore esterno alla scheda per applicazioni a bassa tensione, o utilizzando la porta micro-USB presente dalla parte del microcontrollore Target, oppure collegando una sorgente di alimentazione esterna ai pin VDD, situati sull'*expansion header*. Negli ultimi due modi definiti per alimentare il kit di sviluppo, non viene trasferita energia al KitProg che risulta quindi non alimentato. Per utilizzare un alimentatore esterno, mentre il KitProg è collegato al PC tramite USB, occorre rimuovere il diodo D1 dalla scheda per garantire che l'alimentazione VTARG dal KitProg non sia fornita al dispositivo Target.[15],[16],[17],[18]

Il vero vantaggio di essere un System On Chip è che, con le schede della serie PSoC, le configurazioni analogiche più complesse possono essere implementate direttamente nel chip così, se si richiede una modifica alla parte analogica, questa può essere fatta in maniera semplice, rapida e sicura per mezzo dell'ambiente di sviluppo, senza che sia necessario ridisegnare una nuova scheda con componenti diversi. Il chip infatti, all'interno presenta tre parti principali strettamente legate tra di loro, che sono: il blocco microprocessore, il blocco configurabile analogico ed il blocco configurabile digitale.

Quest'ultimo è molto simile ad un Field Programmable Gate Array (FPGA) in cui le varie funzioni digitali sono programmabili via software in linguaggio Verilog: tramite tale linguaggio infatti è possibile collegare tra loro le varie parti digitali integrate in un chip per produrre funzioni logiche che possono andare da semplici operazioni booleane ad operazioni anche molto più complesse come Timer, contatori, blocchi PWM (Pulse Width Modulation) e molto altro. In PSoC questo avviene sia per le funzioni booleane, sia per le funzioni dette UDB (Universal Digital Block). Esistono però anche altre funzioni dette FF (Fixed Function) che costituiscono dei blocchi PWM, Timer, ecc. fissi, completi e già disponibili all'interno del chip, che per poter essere utilizzati devono essere inizializzati tramite ambiente grafico o registri. La limitazione delle funzioni FF sta nelle prestazioni e configurazioni delle stesse. Ad esempio i blocchi PWM-FF hanno un contatore interno che funziona solamente in modalità count-down, a 8 bit, e non hanno le innumerevoli funzioni di cui sono equipaggiati i blocchi UDB.

Cypress per rendere tale sistema fruibile anche ai programmatori che non hanno esperienza nella configurazione di porte logiche, fornisce delle funzioni Verilog predefinite, mascherate da blocchi grafici facilmente utilizzabili. Quest'aspetto rende PSoC molto più accessibile e user-friendly rispetto ad un FPGA. I blocchi digitali programmabili possono essere utilizzati come parti di un microcontrollore ed è per questo che, oltre a mascherare i comandi Verilog per costruire il componente, da ogni simbolo grafico vengono generati automaticamente anche i driver in C per interfacciarsi con tali blocchi, rendendo lo sviluppo del codice principale molto più veloce dato che parte del lavoro necessario in un normale DSP (Digital Signal Processor) è già fatto di default. Si possono configurare così molto semplicemente i blocchi PWM, i timer, i contatori e tutti i blocchi comuni ad ogni DSP, ma anche porte logiche come AND, OR, XOR, fino all'esaurirsi delle risorse digitali interne al circuito integrato. Questo sistema permette soluzioni irrealizzabili con altri microcontrollori poiché è possibile operare con i segnali digitali direttamente a livello hardware, aspetto che può consentire un notevole risparmio

computazionale per la CPU in moltissimi casi. Per capire meglio le differenze tra un normale microcontrollore e il PSoC si può far riferimento alla figura seguente:

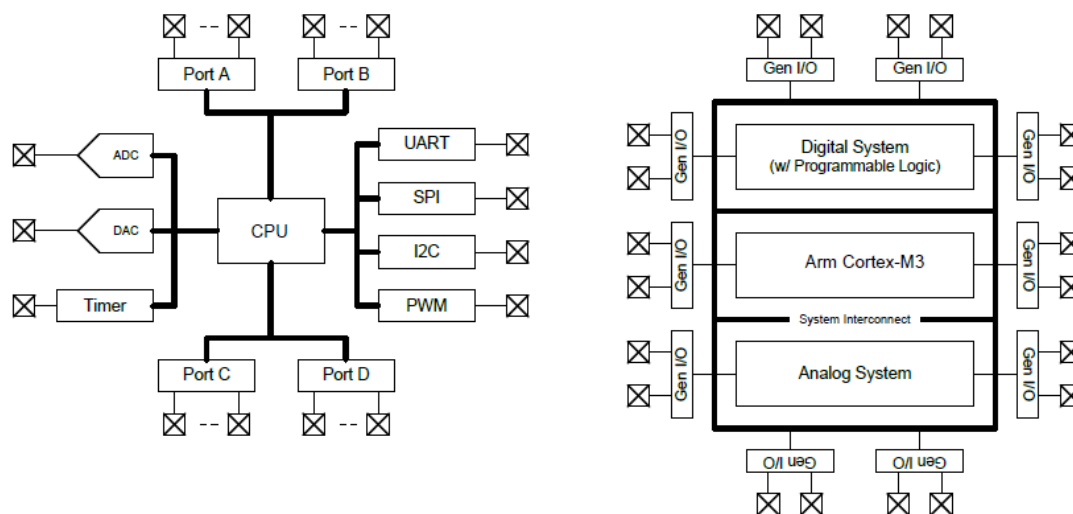


Figura 3.1.3 Struttura di un microprocessore a sinistra, di un PSoC a destra. [19]

Un microcontrollore ordinario contiene una CPU ed un set di periferiche come ADC, DAC, UART, SPI e I/O generici, tutti collegati ai registri di interfaccia con la CPU. In genere, la CPU è il cuore ed il cervello del sistema poiché ad essa sono assegnati tutti i compiti possibili, dal setup delle periferiche, al movimento di dati. Un normale microcontrollore senza CPU non può funzionare e questa è la differenza sostanziale tra microcontrollore e PSoC. Dalla figura si può vedere come il sistema PSoC sia molto diverso. In questo caso la CPU, i componenti analogici, i componenti digitali e gli I/O presentano lo stesso livello gerarchico e di importanza per il funzionamento del sistema. Ora infatti, il cuore del sistema non è più la CPU, ma lo sono la programmabilità e l'indirizzamento delle periferiche, dato che da queste funzionalità derivano le caratteristiche del sistema finale. I blocchi analogici e digitali sono interconnessi tramite un approccio a matrice che rende il sistema altamente programmabile e facilmente riconfigurabile in modo da creare ed ottimizzare la soluzione ottimale per qualsiasi applicazione. Un microcontrollore tradizionale richiede sempre che la CPU processi il

firmware per realizzare i vari compiti adibiti al controllore, siano essi controllare gli stati delle periferiche, utilizzare un timer per le temporizzazioni, eseguire calcoli: in ogni caso la CPU dovrà intervenire, scrivendo dei registri (es. attivazione timer) o utilizzando le proprie funzionalità interne (es. ALU per somme e moltiplicazioni). Nei dispositivi PSoC invece anche la *Asynchronous Parallel Processing* è consentita, ovvero è possibile assolvere alcuni compiti senza l'utilizzo della CPU, utilizzando i blocchi digitali per costruire funzioni dedicate che sgravano così l'unità centrale da compiti che la rallenterebbero, e la rendono così libera di essere utilizzata per le sole mansioni computazionali. [14], [17]

PSoC Creator è l'ambiente di progettazione integrata (IDE) che consente lo sviluppo hardware e software di sistemi basati sui vari PSoC 3, PSoC 4 e PSoC 5LP. Per la costruzione del sistema hardware su cui poggerà tutto l'algoritmo è sufficiente trascinare i componenti (per ognuno dei quali è disponibile un datasheet) disponibili nella libreria standard Cypress nello schema del progetto, collegarli e settarli in modo da iniziarli in un modo molto semplice e veloce.

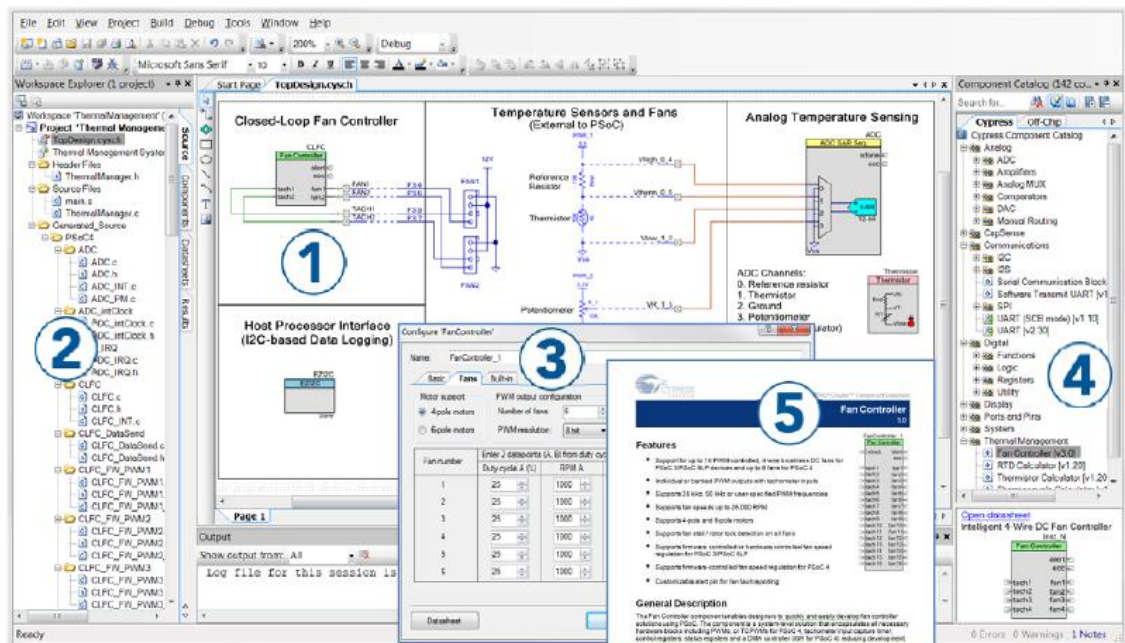


Figura 3.1.4 Caratteristiche di PSoC Creator.[15]

È importante, sia che si usino solo componenti hardware, sia che si usino solo blocchi comandati via software, che questi vengano comunque inseriti nello schema in maniera che al momento di produrre il programma per il chip, PSoC Creator sia in grado di generare gli opportuni collegamenti interni tra le risorse. Per l'attivazione dei componenti invece è sempre necessaria un'inizializzazione via software che però è molto semplificata poiché consiste in un'API (Application Program Interface, è una funzione scritta in C generata automaticamente dal Creator una volta rilevato un componente nello schema) che carica i dati impostati nell'interfaccia grafica del componente nel programma finale eseguito dal microcontrollore. Oltre alla libreria standard c'è anche una libreria di componenti esterni utilizzabili per creare uno schema completo del sistema. Tali componenti non hanno alcuna funzione all'interno del Creator e hanno un uso puramente illustrativo per creare un'esaustiva documentazione del progetto.[14],[15],[17],[18]

Per prendere confidenza con questa schedina sono presenti degli esempi di codici nella pagina iniziale di PSoC Creator. Per lo scopo del progetto in analisi, sono stati studiati

approfonditamente i componenti UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) e ADC (Analogic-Digital Converter) che verranno utilizzati per convertire i segnali analogici di corrente e tensione del pacco batteria in segnali digitali che verranno trasmessi tramite porta seriale al PC. Nell'Appendice A si possono trovare i codici di prova del PSoC Creator e anche quelli di Matlab, che è stato usato per leggere i dati ricevuti dalla porta seriale.

3.2 Caricabatterie

In genere, un BMS è in grado di comunicare e inviare comandi al caricabatterie per gestirne, per esempio, le fasi di ricarica. In questo caso però si è già in possesso di un caricabatterie progettato per le batterie al piombo acido (o VRLA, Valve Regulated Lead-Acid) e che si può configurare per operare in due diversi modi di ricarica: *Float Mode* e *Auto 3 Stage Mode*:

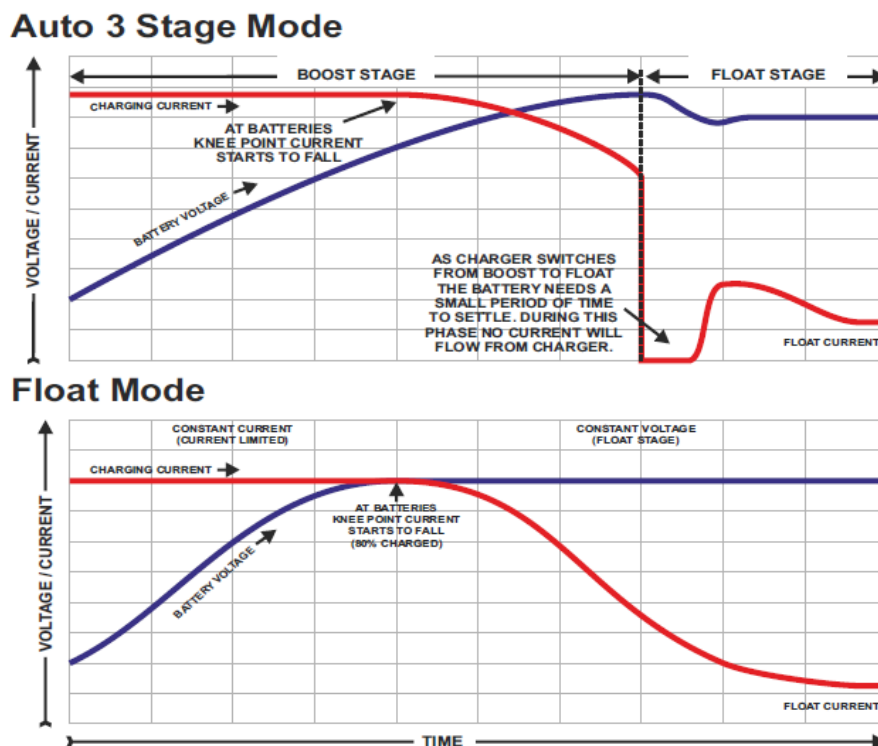


Figura 3.2.1 Profili di ricarica del caricabatterie.[20]

È stato scelto di impostare la modalità *float* che prevede: una prima fase a corrente costante, ad un valore che non sottoponga la batteria a sollecitazioni eccessive, che consente alla tensione della batteria di salire rapidamente; la seconda fase inizia quando si raggiunge il “ginocchio” della curva di tensione, ovvero si è raggiunta la tensione di fine carica. Il caricabatterie mantiene la tensione costante finché la corrente non si esaurisce, il che determina il raggiungimento della piena carica. Questo metodo è ampiamente utilizzato perché la differenza tra la tensione di una batteria scarica e la tensione imposta dal caricabatterie può essere tale da portare ad una corrente elevata e dannosa. Nella modalità a tre *stage*, dopo la prima fase a corrente costante, si impone ancora la corrente ma ad un valore via via decrescente; nel frattempo la tensione continua a salire e quando raggiunge un valore limite di reversibilità la corrente viene portata a zero e la si mantiene per un breve periodo in cui la tensione torna al valore di fine carica, successivamente inizia la fase a tensione costante.[20]

3.3 Progettazione dell'hardware

Come già accennato, si è in possesso di quattro batterie VRLA con capacità nominale 38Ah e tensione nominale 12V ciascuna, che in fase di ricarica possono raggiungere al massimo una corrente di 15.2A (nella fase iniziale) e una tensione pari a 14.9V.[21] L'obiettivo è monitorare la ricarica di una singola batteria disposta in serie con le altre tre, che equivarrebbe alla funzione di un BMS in modalità *slave* nel caso di una configurazione distribuita (si veda il capitolo 2.4). Occorre quindi portare il livello di tensione della batteria ad un valore compatibile per il PSoC, ovvero non eccedente i 5V, attraverso un partitore di tensione con un guadagno:

$$\alpha = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{5V}{14.9V} \cong \frac{1}{3} \quad (9)$$

Per ottenere tale rapporto, tre resistenze da 2kΩ sono poste in serie e la V_{out} viene riferita ai capi di una sola di queste resistenze. Il segnale di tensione verrà poi pulito da eventuali disturbi e rumori da un filtro passa basso a un polo:

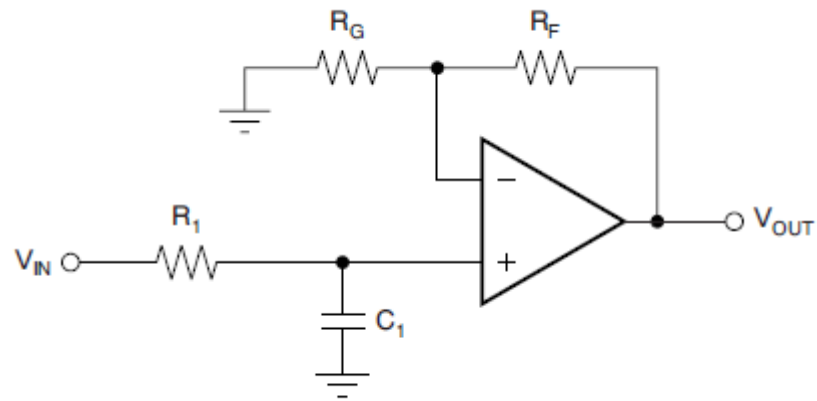


Figura 3.3.1 Schema del filtro passa-basso a un polo.[22]

In questo caso la funzione di trasferimento è la seguente: [22]

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right) \left(\frac{1}{1+sR_1C_1}\right) \quad (10)$$

Come prima fase di progettazione del filtro, occorre imporre una frequenza di taglio desiderata che ha la seguente formulazione: [22]

$$f_t = \frac{1}{R_1C_1} \quad (11)$$

Se le resistenze vengono poste tutte uguali a $22\text{k}\Omega$, si impone la f_t pari a 100Hz , si ottiene un C_1 uguale a 470nF . In questo modo, si ha un guadagno unitario, cioè la tensione in ingresso è uguale a quella in uscita, e i segnali ad alta frequenza, dovuti a disturbi come il rumore, verranno filtrati dalla frequenza 100Hz in poi. Per verificare che il filtro funzioni è stata fatta una simulazione attraverso il software Matlab Simulink in cui è stato riproposto il circuito:

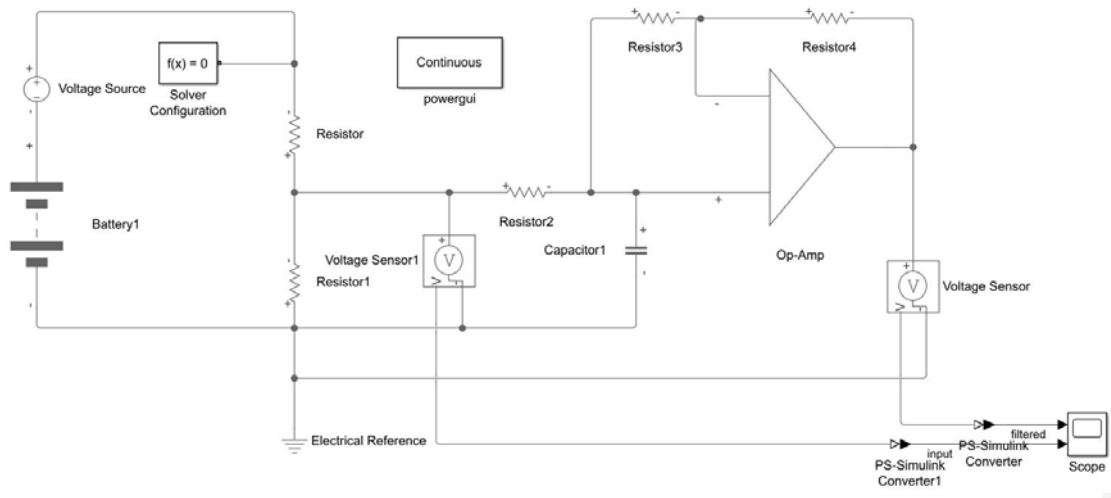


Figura 3.3.2 Circuito di simulazione del filtro passa-basso in Simulink.

Una sorgente di tensione sinusoidale posta in serie alla batteria, con frequenza pari a 1kHz e ampiezza di picco di 0.1V, simula un disturbo alle alte frequenze. Come si può vedere dalla Figura 3.3.3, che raffigura ciò che mostra l'oscilloscopio, la curva che sta sopra è priva del disturbo, che è invece visibile nella curva sottostante. Inoltre, non vi è nessun guadagno o attenuazione di ampiezza. Anzi, l'ampiezza risulta di 4V poiché il partitore di tensione abbassa di un terzo la tensione di 12V, valore nominale della batteria, proprio come progettato. Avuto conferma di questo, si può ritenere che il filtro sia completamente progettato.

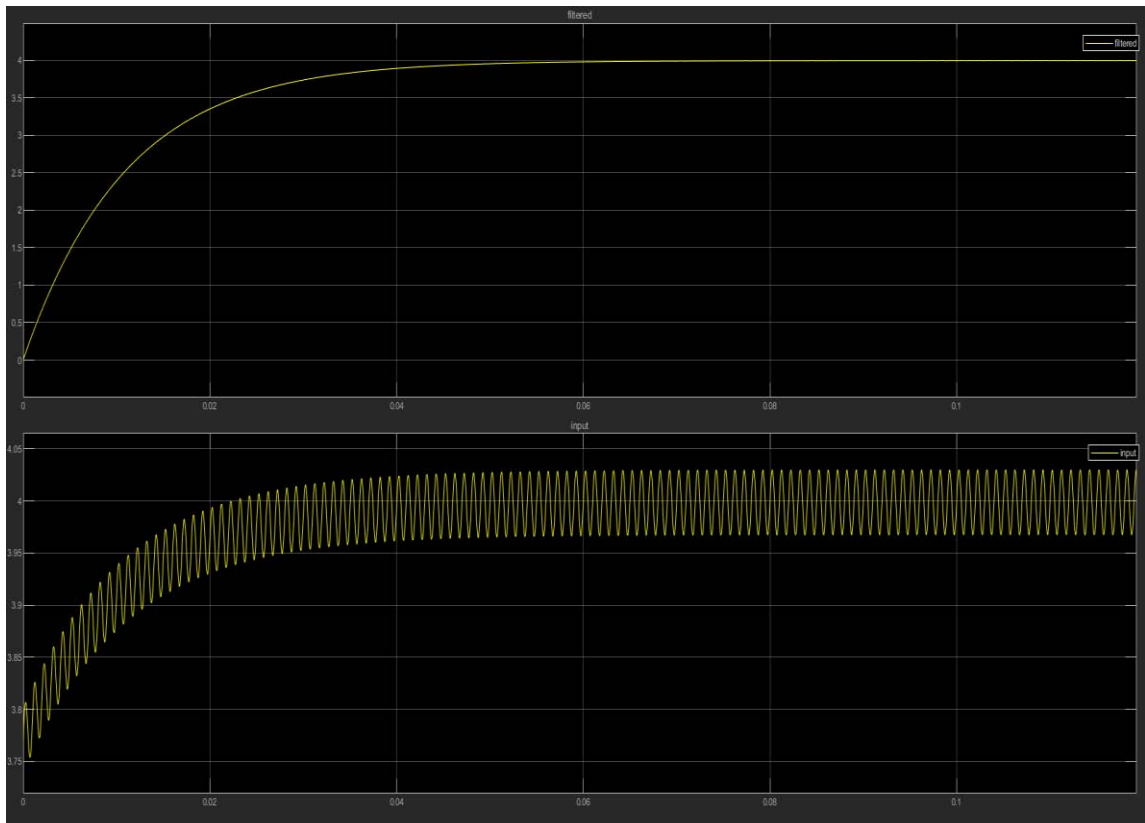


Figura 3.3.4 Andamento della tensione filtrata, sopra, e della tensione prima del filtro, sotto.

La corrente viene misurata attraverso un trasduttore di tipo LEM, che sfrutta l'effetto Hall grazie alla quale si ha una separazione galvanica tra il circuito primario e secondario. È dimensionato per una corrente nominale al primario di 15A, ma può misurare fino a 37.5A, e restituisce un valore di tensione corrispondente secondo il seguente andamento lineare:

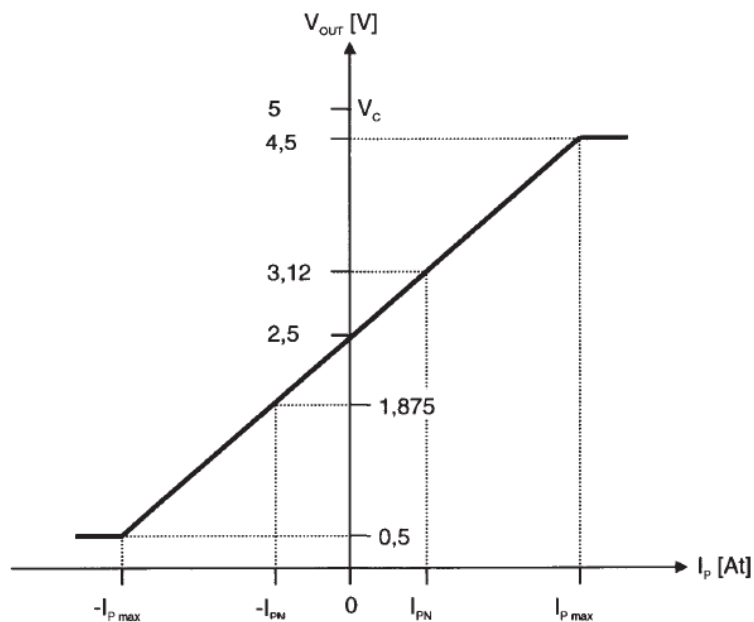


Figure 3.3.2 Caratteristica della tensione uscente V_{out} al variare della corrente al circuito primario I_p . [23]

Dove I_{PN} è la corrente nominale del circuito primario, I_{Pmax} è quella massima, V_C è la tensione di alimentazione e V_{out} è il segnale uscente di tensione. Come si può dedurre dalla Figura 3.3.2, è possibile misurare anche una corrente negativa restituendo comunque una tensione positiva e nel range di valori ammessi dal PSoC. Occorre però prestare attenzione al riferimento della tensione di uscita. Infatti, deve essere riferita al pin di terra e non al pin della tensione di riferimento interna perché equivarrebbe a traslare la curva della V_{out} verso il basso di 2.5V [24]; quindi per correnti negative si otterrebbero tensioni negative che non possono essere lette dal PSoC. Il segnale uscente verrà filtrato allo stesso modo del segnale di tensione della batteria.

Il LEM, così come il chip PSoC, devono essere alimentati a 5V. Per simulare un vero BMS per veicoli elettrici, l'intero sistema deve essere direttamente alimentato dalla batteria. A tale scopo, è necessario installare un convertitore DC-DC con la funzione di abbassare la tensione della batteria fino ai 5V. Si è selezionato il convertitore non isolato

OKR-T/3 della Murata Power Solutions che è regolabile attraverso una resistenza esterna, chiamata nel datasheet R_{trim} :

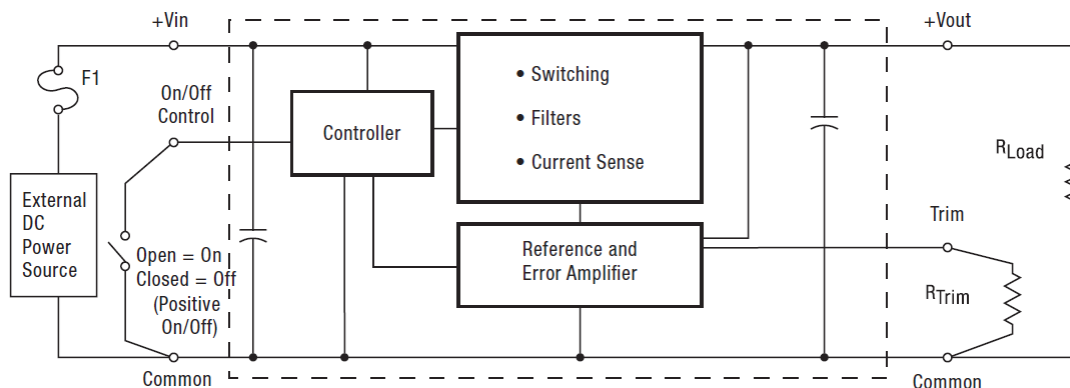


Figure 3.3.3 Schema circuitale delle connessioni del convertitore DC-DC.[25]

Per ricavare 5V in uscita dal pin V_{out} , R_{trim} deve essere calcolata secondo quanto indicato dal produttore del convertitore:

$$R_{trim}(k\Omega) = \frac{1.182}{V_{out} - 0.591} \cong 270\Omega \quad (12)$$

A completare la selezione dei componenti da inserire si aggiungono delle capacità e una resistenza di carico consigliate dal produttore del LEM [24]. In definitiva si ottiene il seguente circuito:

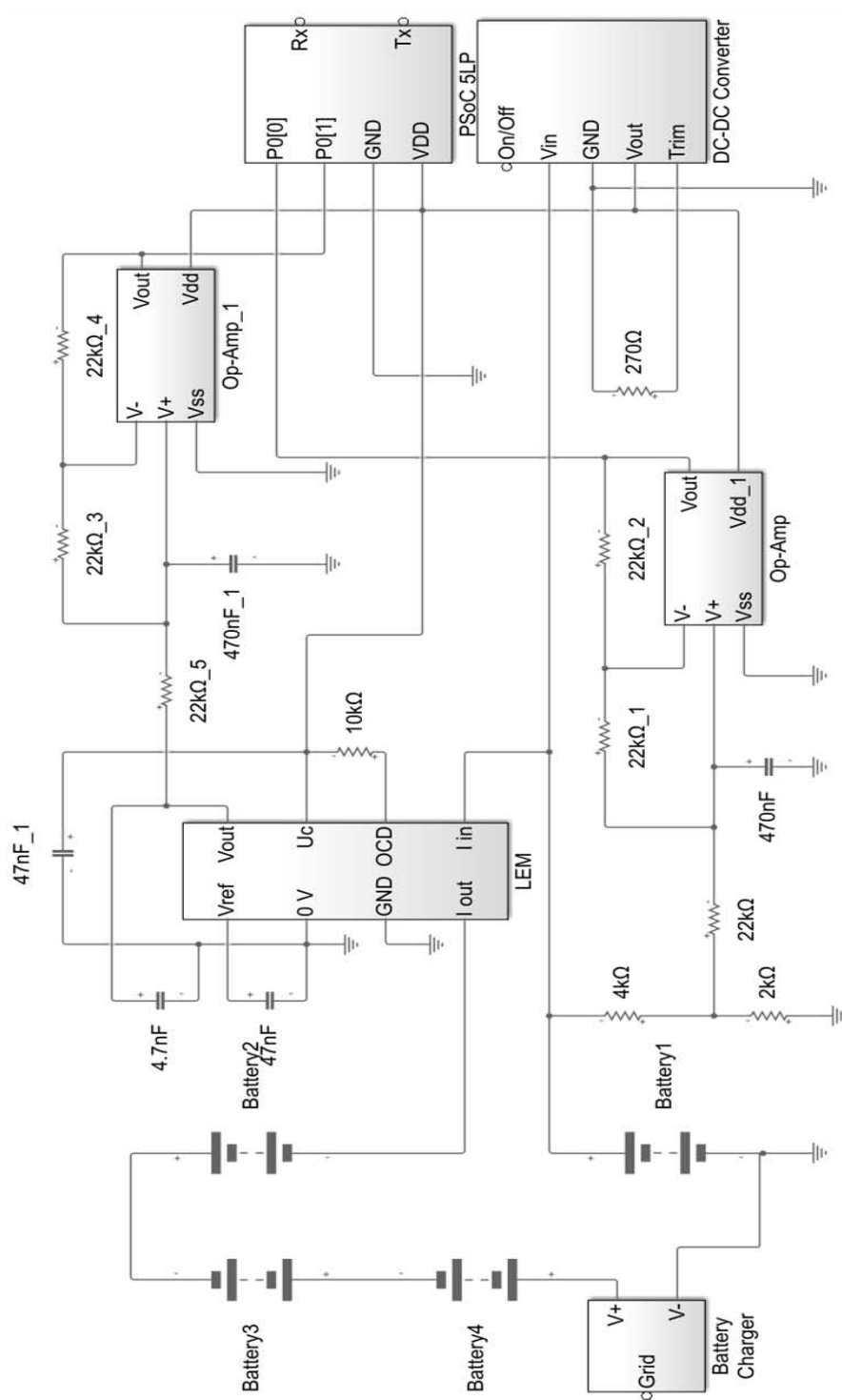


Figura 3.3.4 Schema completo del circuito progettato come parte di un BMS.

Il pin $P0[0]$ riceve il segnale di tensione, mentre il pin $P0[1]$ riceve quello di corrente, entrambi vengono convertiti dal ADC del chip PSoC in segnali digitali, successivamente inviati al PC grazie ai pin Rx e Tx che sono quelli abilitati per la connessione UART. I pin V_{ss} e V_{dd} degli amplificatori operazionali sono rispettivamente il pin di riferimento, collegato alla terra, e il pin di alimentazione, per il LEM esso è denominato U_c ed entrambi si trovano, come già menzionato, a 5V. Il LEM predispone anche di un pin OCD che, nel caso di sovracorrente in ingresso, evita il danneggiamento del dispositivo cortocircuitando la corrente tra i pin di ingresso e di uscita.

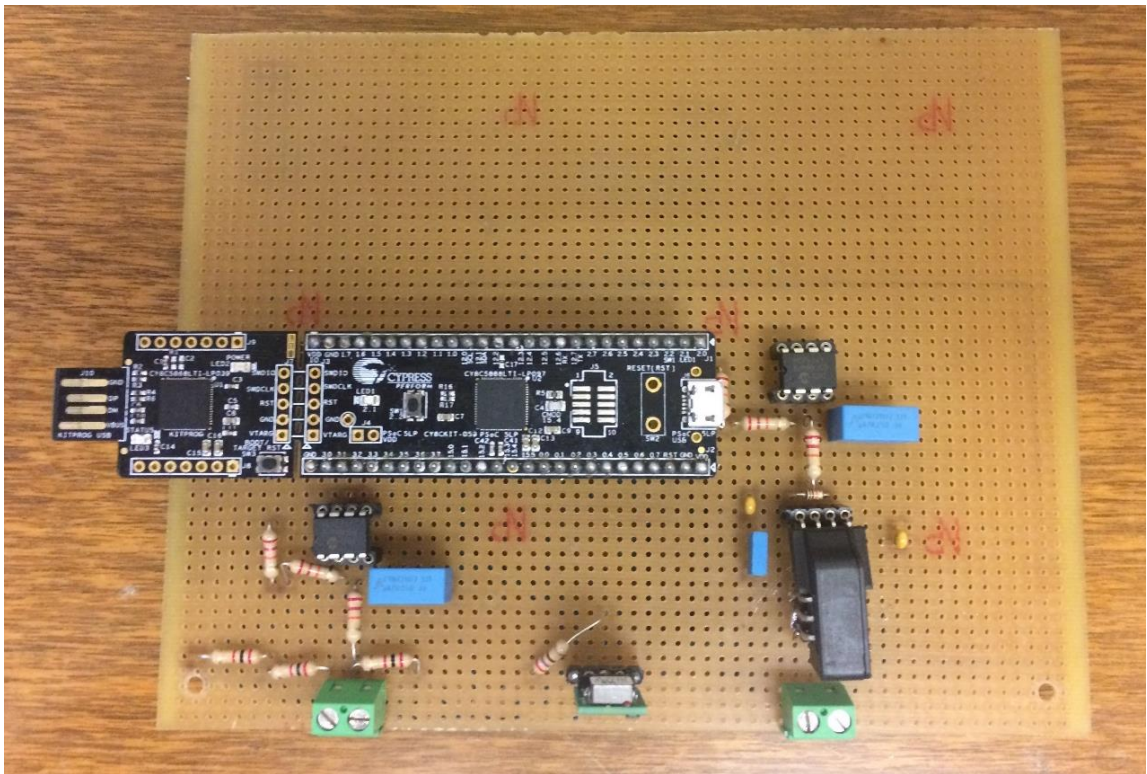


Figura 3.3.5 Fotografia del circuito.

3.4 Programmazione del software

La UART implementa il protocollo di comunicazione asincrona comunemente conosciuto come RS232 o RS485. Il componente UART può essere configurato in quattro modalità:

- Full Duplex per avere una comunicazione bidirezionale
- Half Duplex per una comunicazione bidirezionale ma in una sola direzione alla volta
- RX per ricevere soltanto
- TX per trasmettere soltanto.

In questo caso è stata selezionata la configurazione Full Duplex in modo che il PC e il chip possano comunicare contemporaneamente.

Per facilitare l'elaborazione della ricezione e della trasmissione dei dati UART, sono presenti dei buffer indipendenti di dimensioni configurabile che aiutano a garantire che i dati non vengano persi. Ciò consente alla CPU di dedicare più tempo alle attività in tempo reale piuttosto che alla gestione dell'UART. Per la maggior parte dei casi d'uso, è possibile configurare facilmente l'UART scegliendo la velocità di trasmissione, la parità, il numero di bit di dati e il numero di bit di avvio. La configurazione più comune per RS232 è spesso nominata "8N1", che è un abbreviativo per otto bit di dati, nessuna parità e un bit di stop. Questa è la configurazione predefinita per il componente UART. Pertanto, nella maggior parte delle applicazioni è sufficiente impostare la velocità di trasmissione, che di default è pari a 57600.[26] La cosa importante a cui occorre prestare attenzione è che siano date delle impostazioni concordi sia al PSoC che al PC. A tal proposito, connettendo il PSoC ad un PC tramite USB, è possibile vedere le proprietà di connessione in “Gestione dispositivi” (se il sistema operativo utilizzato dal PC è Windows 10) e poi in “Porte (COM e LPT)” dove comparirà la nostra schedina sotto il nome “KitProg USB-UART (COMx)”. La configurazione prevede quindi “8N1” e 9600 bits per secondo. Questi dati verranno

inseriti anche in Matlab per aprire la connessione con la porta seriale a cui è connesso il PSoC, attraverso il comando:

```
s = serialport("COM4",9600);
```

Non resta che dimensionare i buffer a 8 bytes e il componente UART è completamente progettato.

Nel workspace del PSoC Creator (Figura 3.4.1) va aggiunto il componente ADC_SAR_Seq (Sequencing Successive Approximation Analogic-Digital Converter) grazie alla quale è possibile configurare più canali analogici che vengono automaticamente scansionati e i risultati vengono posizionati in locazioni individuali nella SRAM (Static RAM). L'ADC potrebbe elaborare i segnali analogici di input in maniera differenziale oppure come *single-ended* in cui ogni segnale è riferito al pin V_{ss} , ovvero alla massa del sistema. La modalità di campionamento viene configurata come *Free Running* in modo che converta continuamente, altrimenti si potrebbe chiamare l'inizio della conversione tramite software nella modalità *Software Trigger*. Il segnale digitale in uscita da ogni canale va poi convertito nel sistema decimale, ed è possibile farlo con il codice API `ADC_SAR_Seq_1_CountsTo_mVolts` che restituisce già il valore in millivolt che successivamente verrà memorizzato nel buffer per poi essere inviato tramite UART.[27] Il codice finale è riportato nell'Appendice A, al fondo dell'elaborato.

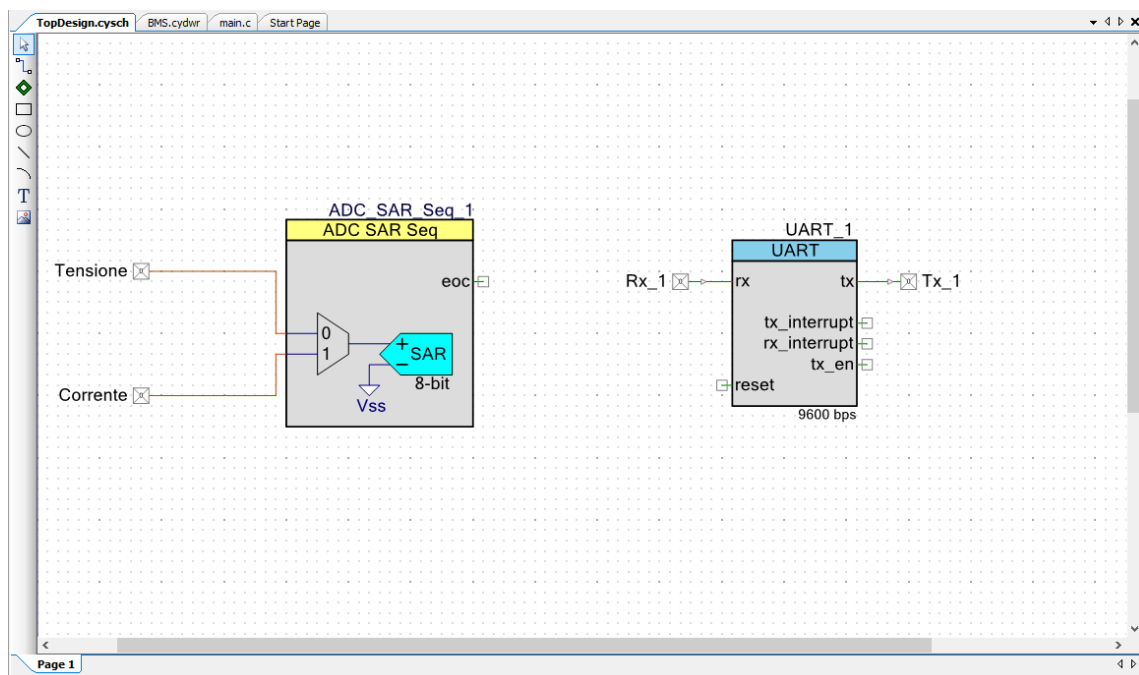


Figura 3.4.1 Workspace del PSoC Creator.

3.5 Test effettuati

La prima prova effettuata consiste nel testare l'integrità delle batterie e la corretta configurazione del caricabatterie. Quindi si sono messe in carica le batterie e a intervalli si è misurata la tensione e la corrente. Si è notato che la tensione dell'intero pacco non ha superato i 54V dopo la prima fase di ricarica a corrente costante che è stata breve. Infatti, il caricabatterie si trovava nella modalità a tensione costante, 53.8V, e i valori di corrente erano di circa 1A e andavano diminuendo lentamente alle successive misurazioni.

Per testare invece di aver collegato correttamente le varie componenti al chip PSoC, è stata fatta una prova con un alimentatore regolabile sia in tensione che in corrente. Partendo dalla tensione minima ammessa dal convertitore DC-DC con la quale si è alimentato tutto il circuito, ovvero 7V, si è collegato il chip al computer e avviato il codice programmato. Variando tensione e corrente in ingresso con l'alimentatore è stato possibile così anche verificare che il codice fosse scritto correttamente, con i fattori di conversione

e l'indirizzamento nei canali corretti, e anche controllare se fosse stato necessario correggere i guadagni delle misure da eventuali offset.

Una volta caricate le batterie è stato effettuato un test di scarica su due resistenze poste in serie: una fissa a 10Ω e una che poteva variare da zero a 20Ω . Inizialmente è stata impostata la resistenza massima che si poteva ottenere e, una volta collegato il carico alle batterie, si è andati a modificare la resistenza variabile in modo da ottenere più o meno corrente di scarica, concludendo la prova a corrente massima e resistenza variabile posta a zero. Si è monitorata una batteria centrale del pacco e si è ottenuto il seguente andamento per le grandezze misurate:

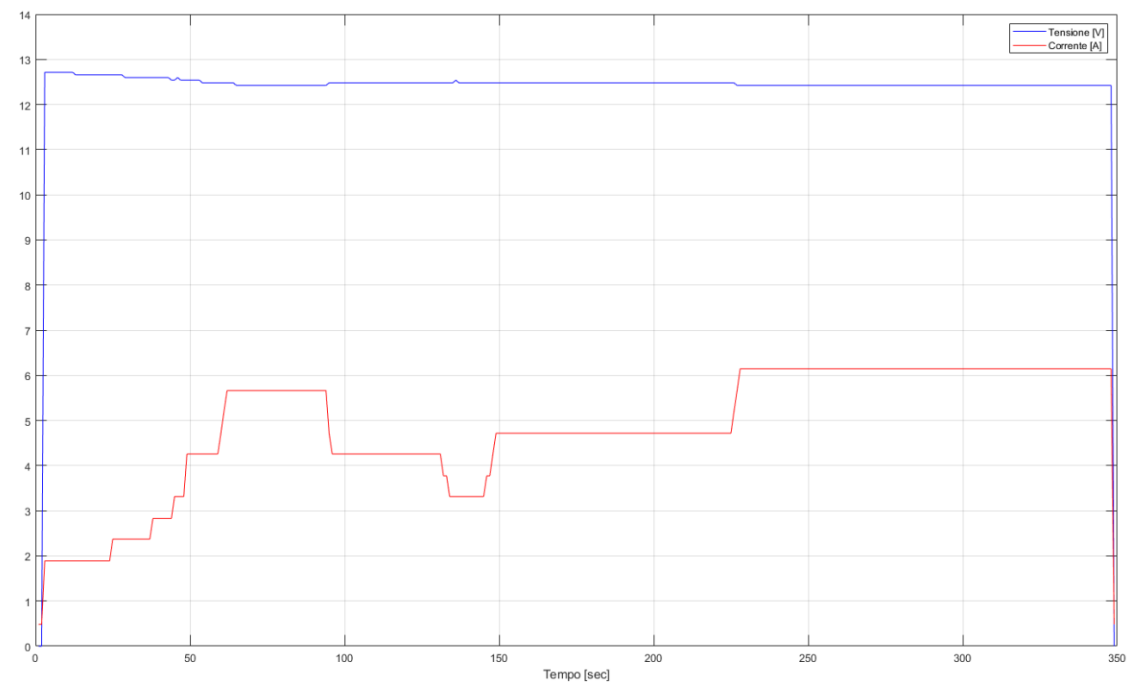


Figura 3.4.2 Andamento della corrente e della tensione di una batteria in fase di scarica.

Si può vedere come la tensione della batteria rimane quasi costante, tra 12.5 e 12.4V, ma leggermente calante per colpa della scarica, seppur il carico non fosse così elevato.

Il test finale, che è lo scopo di tutto il lavoro, riguarda il monitoraggio della ricarica delle batterie. Si è scelto di monitorare la stessa batteria, all'interno del pacco, osservata nel test della scarica e di mettere in evidenza la fase in cui il caricabatterie passa dalla modalità a corrente costante a quella a tensione costante. A tal proposito vengono proposti due grafici: uno a inizio ricarica e uno verso la fine.

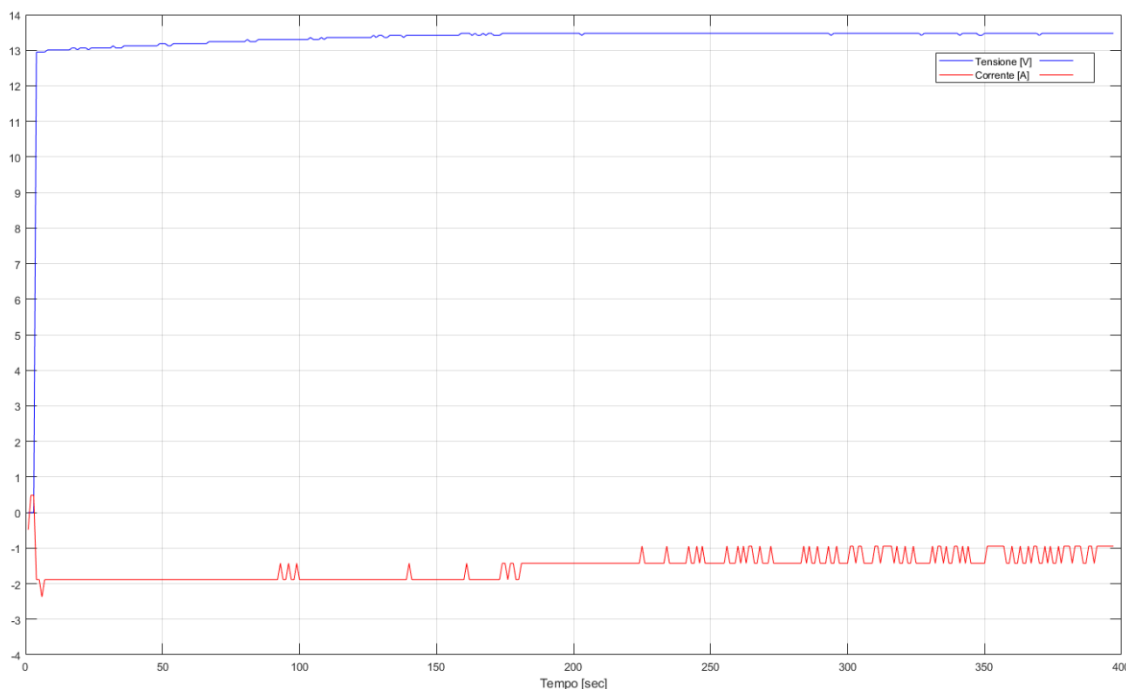


Figura 3.4.3 Andamento della corrente e della tensione di una batteria in una fase iniziale di ricarica.

Da questo grafico si possono osservare due cose ovvie: l'andamento crescente della tensione per metà tempo finché non si assesta intorno a 13.5V, valori di corrente negativi perché si è scelto di lasciare invariato il verso di acquisizione del LEM. Verso metà del grafico si può cogliere il cambio di modalità di ricarica: inizialmente la tensione cresce lentamente e la corrente è costante a circa 2A, successivamente la tensione rimane costante e la corrente si abbassa lentamente. In quest'ultima fase si può vedere come il caricabatterie introduca un rumore, un disturbo al segnale di corrente che il filtro passa-basso non riesce ad eliminare completamente. Molto probabilmente è dovuto alle

armoniche derivanti dalla conversione della tensione da alternata della rete in corrente continua.

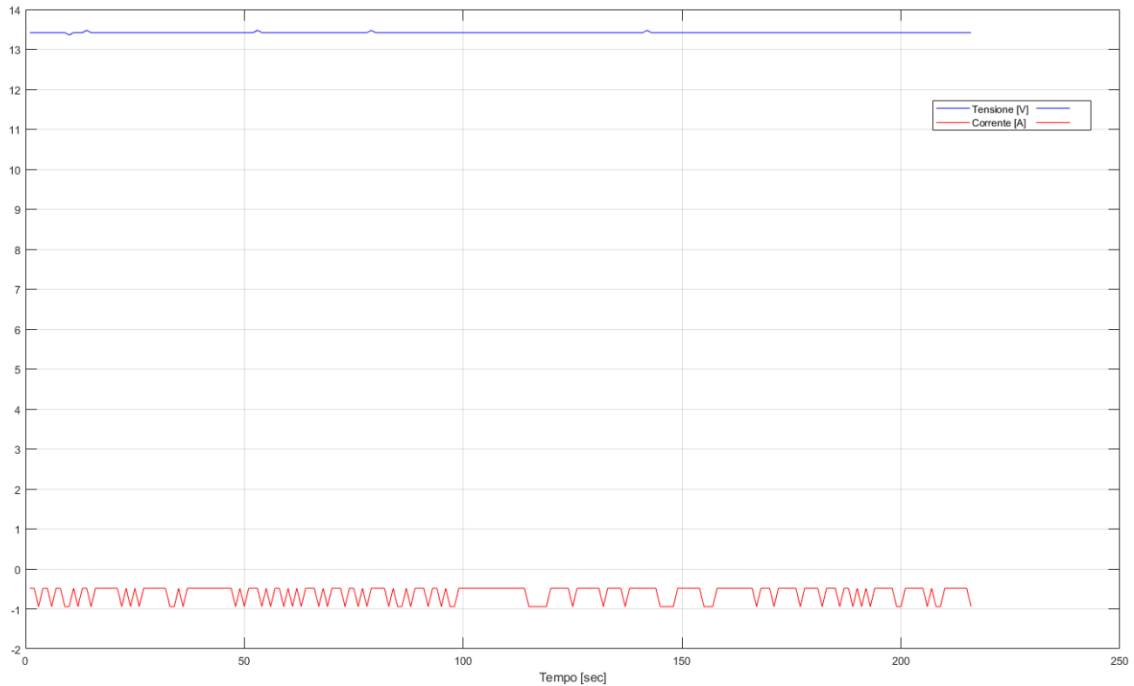


Figura 3.4.4 Andamento della corrente e della tensione di una batteria nella fase finale di ricarica.

La ricarica termina nella fase a tensione costante finché la corrente non raggiunge lo zero o quasi. Infatti, si può intuire dalla Figura 3.4.4 che viene riportata la fase finale della carica in quanto la corrente è inferiore a 1A. Anche in questo caso, è evidente il disturbo al segnale della corrente introdotto dal caricabatterie.

4. Conclusione

Il grafico ottenuto tramite Matlab rappresenta l'elaborazione dei dati ricavati dal monitoraggio della batteria. In questo contesto, il BMS progettato non è ancora completo e si potrebbero aggiungere altre funzionalità che non sono state implementate in questo studio in quanto esso consiste in un primo step di progettazione. Per quanto riguarda la funzionalità implementata invece, si potrebbe introdurre una miglioria. Come è stato evidenziato nel capitolo finale, il segnale di corrente presentava un disturbo che potrebbe compromettere una eventuale elaborazione da parte di un componente che costituirà il *master* di un BMS completo. Per rimediare a questa imperfezione occorrerebbe modificare il filtro portando, per esempio, la frequenza di taglio a 10Hz, oppure introdurre un filtro digitale mediante il codice di programmazione. Le successive fasi della progettazione potrebbero prevedere: l'inserimento di altre unità *slave* che monitorano le altre batterie del pacco, portando particolare attenzione all'isolamento tra le singole unità; l'aggiunta di un chip con la funzione di *master*, che riceve i segnali dalle unità *slave* e gli elabora in modo da poter gestire e inviare eventuali comandi e si interfaccia con il PC, che potrebbe rappresentare il monitor di bordo di un veicolo elettrico; il design di un caricabatterie comandabile dal *master* per eseguire le fasi di ricarica mostrate nei capitoli precedenti. Infine, si potrebbe aggiungere al circuito un sistema di bilanciamento attivo, dando questa responsabilità ad ogni unità *slave*, e introdurre un algoritmo della stima del SOC. Dopo tutte queste implementazioni, occorre portare l'attenzione alla fase di scarica di queste batterie, e quindi dimensionare il BMS tenendo conto del carico all'interno di un veicolo elettrico che è rappresentato principalmente dal motore elettrico. L'inverter potrebbe altresì essere comandato dal BMS per esempio per attuare una modalità di guida a risparmio energetico, nel caso in cui il sistema di accumulo sia prossimo a scaricarsi l'utente potrebbe scegliere di limitare le prestazioni del veicolo per non esaurire del tutto la carica delle batterie.

Ringraziamenti

Giunto al termine di questo percorso, sono stato felice e contento nell'aver scelto come relatore il Professor Manuele Bertoluzzo a cui vanno i miei più sentiti ringraziamenti.

Un particolare ringraziamento va anche ai miei compagni di viaggio Stefano Giacomuzzi e Alessandro Ragogna che hanno alleggerito le giornate, soprattutto Alessandro che si è reso disponibile ad aiutarmi nel caso di difficoltà nella saldatura delle componenti.

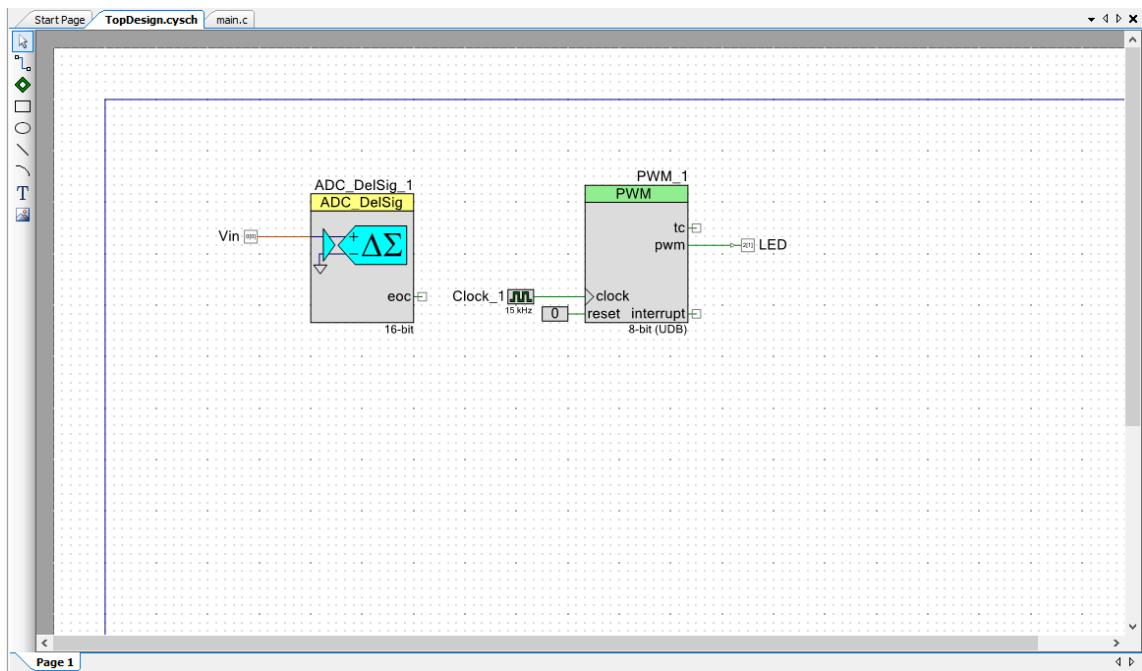
L'ultimo ringraziamento lo dedico alla mia famiglia, alla mia fidanzata e ai miei amici più stretti che sono stati fondamentali e preziosi nei momenti di difficoltà che ho dovuto affrontare.

Appendice A

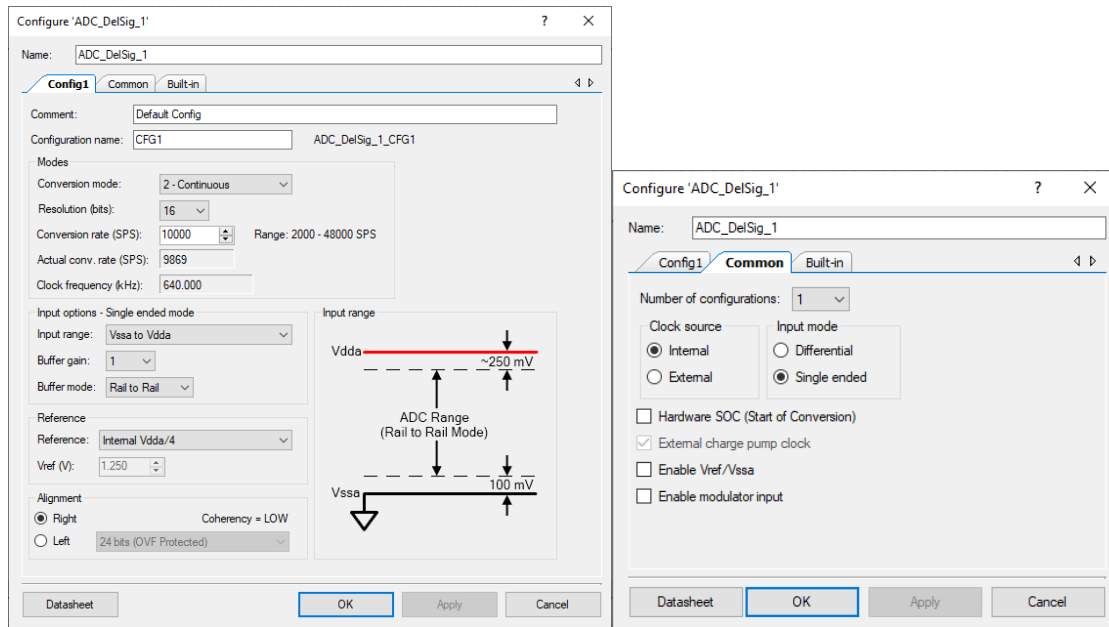
In questa sezione vengono riportati i codici di programmazione delle prove effettuate per imparare ad utilizzare il chip della PSoC, e gli eventuali grafici che mostrano il workspace del PSoC Creator, con lo scopo di semplificare il lavoro per chi un giorno sarà incaricato a proseguire questo studio progettuale.

1) Codice con ADC, PWM, LED

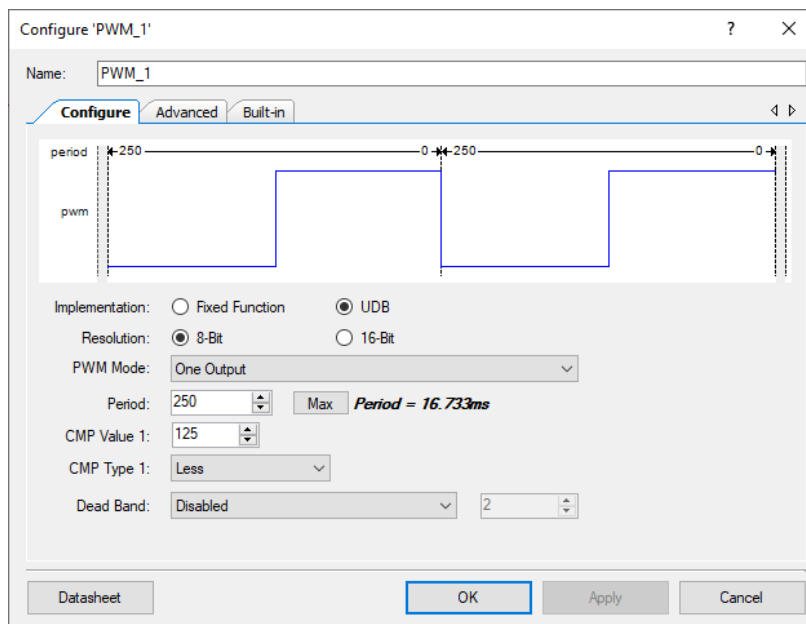
Questo codice riassume le prime prove effettuate per prendere confidenza con l'uso dei componenti più comuni. Un potenziometro è stato collegato ad un pin del chip connesso a un convertitore analogico-digitale, e in funzione della tensione di ingresso misurata, si modificava il duty-cycle della PWM, andando così a regolare l'intensità luminosa del LED. Di seguito è riportato il workspace:



L'ADC va configurata in modo da poter leggere un segnale analogico di tensione nel range dei 5V e in modalità single-ended.



È stato poi configurato il modulo PWM:



Di seguito viene riportato il codice:

```
#include "project.h"

int main(void)
{
    CyGlobalIntEnable; /* Enable global interrupts. */

    /* Place your initialization/startup code here (e.g.
MyInst_Start()) */
    int32 output;
    float32 x;
    int8 duty;
    ADC_DelSig_1_Start();
    ADC_DelSig_1_StartConvert();
    PWM_1_Start();

    for(;;)
    {
        /* Place your application code here. */
        if(ADC_DelSig_1_IsEndConversion(ADC_DelSig_1_RETURN_STATUS))
        {
            output = ADC_DelSig_1_GetResult32();
            x= ADC_DelSig_1_CountsTo_Volts(output);
            duty=50*x;
            PWM_1_WriteCompare(duty);

        }
    }
}

/* [] END OF FILE */
```

2) Codice con ADC a più ingressi analogici e UART

Questo invece è il codice utilizzato nel circuito finale. Il workspace è già mostrato nell'elaborato insieme alla configurazione delle componenti. Viene quindi mostrato soltanto il codice del PSoC Creator e quello di Matlab.

```
#include "project.h"
#include "stdio.h"
#define TRANSMIT_BUFFER_SIZE 32
#define TENS (0x00u)
#define CORR (0x01u)
volatile uint8 result[2];
int main(void)
{
    CyGlobalIntEnable; /* Enable global interrupts. */
    /* Place your initialization/startup code here (e.g.
MyInst_Start()) */
    int32 tensione;
    int32 corrente;
    uint8 ch;
    char TransmitBuffer[TRANSMIT_BUFFER_SIZE];
    ADC_SAR_Seq_1_Start();
    UART_1_Start();
    ADC_SAR_Seq_1_StartConvert();
    for(;;)
    {
        /* Place your application code here. */

if(ADC_SAR_Seq_1_IsEndConversion(ADC_SAR_Seq_1_SAR_RETURN_STATUS))
    {
        result[TENS] = ADC_SAR_Seq_1_GetResult16(TENS);
        result[CORR] = ADC_SAR_Seq_1_GetResult16(CORR);
        tensione = ADC_SAR_Seq_1_CountsTo_mVolts(result[TENS]);
        corrente = ADC_SAR_Seq_1_CountsTo_mVolts(result[CORR]);
        int i = 0;
        while(i!=2)
        {
            ch = UART_1_GetChar();
            if('t' == ch)
            {
                sprintf(TransmitBuffer, "%11u", tensione);
                UART_1_PutString(TransmitBuffer);
                i=i+1;
            }
            if('c' == ch)
            {
                sprintf(TransmitBuffer, "%11u", corrente);
                UART_1_PutString(TransmitBuffer);
                i=i+1;
            }
        }
    }
}
```



```

        }
    }
    i=0;
}
CyDelay(1000); //msec
}
}

/* [] END OF FILE */

```

Il codice Matlab ha la funzione di leggere i dati acquisiti e convertiti dalla porta seriale e tracciarne un grafico.

```

clear
s = serialport("COM5",9600);
n=1;
tensione = [1];
corrente = [1];
while(1)
    writeline(s,"t");
    tensione(n,1)=read(s, 4, 'string');
    writeline(s,"c");
    corrente(n,1)=read(s, 4, 'string');
    tensione(n,1) = tensione(n,1)*6/2000; %[V]
    corrente(n,1) = 15 - (((3120 - corrente(n,1))*15)/(3120 - 2500));
    %[A]
    plot(tensione,'b')
    hold on
    plot(corrente,'r')
    xlabel('Tempo [sec]')
    legend({'Tensione [V]', 'Corrente [A]'})
    hold on
    grid on
    n=n+1;
end

```


Bibliografia

- [1] S. Bodoardo, R. Bojoi, I. Doberdò, A. Tenconi, and S. Vaschetto, “Modellistica per il bilancio energetico di sistemi di ricarica con funzionalità vehicle-to-grid,” 2014.
- [2] RSE, “11/2019 Auto elettrica e de-carbonizzazione: facciamo chiarezza.,” 2019.
- [3] R. Hu, *Scholarship at UWindsor Battery Management System For Electric Vehicle Applications Battery Management System For Electric Vehicle Applications*. 2011.
- [4] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof, and P. J. Ker, “State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19362–19378, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2817655.
- [5] A. Manenti, A. Abba, A. Merati, S. M. Savaresi, and A. Geraci, “A new BMS architecture based on cell redundancy,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 9, pp. 4314–4322, 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2095398.
- [6] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, “A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. August 2016, pp. 834–854, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.001.
- [7] Y. Xing, E. W. M. Ma, K. L. Tsui, and M. Pecht, “Battery management systems in electric and hybrid vehicles,” *Energies*, vol. 4, no. 11, pp. 1840–1857, 2011, doi: 10.3390/en4111840.
- [8] V. D’Angelo, S. Cannavacciuolo, S. Lecce, V. Bendotti, and O. Pennisi, “Enhanced hotplug protection in BMS applications. Part I: Theoretical aspects and practical issues,” *2019 AEIT Int. Conf. Electr. Electron. Technol. Automotive, AEIT Automot. 2019*, pp. 1–5, 2019, doi: 10.23919/EETA.2019.8804513.
- [9] Z. B. Omariba, L. Zhang, and D. Sun, “Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129335–129352, 2019, doi: 10.1109/access.2019.2940090.
- [10] “Lithium-ion battery safety,” 2020. [Online]. Available: <https://www.wattalps.com/lithium-ionbatterysafety/>.
- [11] M. M. Ur. Rehman *et al.*, “Modular approach for continuous cell-level balancing to improve performance of large battery packs,” *2014 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2014*, no. October, pp. 4327–4334, 2014, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953991.

- [12] B. G. Carkhuff, P. A. Demirev, and R. Srinivasan, “Impedance-Based Battery Management System for Safety Monitoring of Lithium-Ion Batteries,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 8, pp. 6497–6504, 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2786199.
- [13] K. W. E. Cheng, B. P. Divakar, H. Wu, K. Ding, and H. F. Ho, “Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 76–88, 2011, doi: 10.1109/TVT.2010.2089647.
- [14] F. Bordignon, “Utilizzo di un dispositivo PSoC per il controllo e la gestione di un carica batterie wireless,” Università degli Studi di Padova, 2017.
- [15] Cypress Semiconductor, “CY8CKIT-059 PSoC ® 5LP Prototyping Kit Guide.” p. 48.
- [16] M. Giorio, “Studio e implementazione di un sistema di comunicazione wireless,” Università degli Studi di Padova, 2019.
- [17] Cypress Semiconductor, “KitProg User Guide,” no. 001. p. 54, 2016.
- [18] Cypress Semiconductor, “PSoC Creator User Guide.” pp. 1–572.
- [19] Cypress Semiconductor, “Getting Started with PSoC 5LP,” no. 001. pp. 1–23.
- [20] RS Components, “Datasheet SM82 Switchmode Range of Automatic Battery Chargers.” .
- [21] Panasonic, “Individual Data Sheets - LC-XC1238P.” .
- [22] Texas Instruments, “Industry-Standard Dual Operational Amplifiers.” 2019.
- [23] LEM, “Isolated current and voltage transducers.” .
- [24] LEM, “Current Transducer HO-NP series.” .
- [25] Murata Power Solutions, “OKR-T/3 Series, Adjustable Output 3-Amp SIP-mount DC/DC Converters.” .
- [26] Cypress Semiconductor, “Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART),” no. November 2002. pp. 1–56, 2016.
- [27] Cypress Semiconductor, “Sequencing Successive Approximation ADC (ADC _ SAR _ Seq) Input / Output Connections.” pp. 1–20.