



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA**

**“Battery management system
basato sul circuito integrato LTC6810-2”**

Relatore: Prof. / Dott. Simone Buso

Laureando/a: Enrico Zanetti

Matricola: 1195807

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Data di laurea 19/07/2022

ABSTRACT

In questa tesi viene descritto il processo di progettazione e realizzazione del Battery Management System per una vettura formula SAE.

Questa nuova scheda per la gestione della batteria a bassa tensione tenta di migliorare l'affidabilità del sistema precedente con un design completamente nuovo rispetto al precedente. Sono descritti i principali sistemi di interesse per la trattazione, alcuni dei quali sono stati adattati con delle modifiche. Viene motivata e descritta la scelta dei componenti utilizzati e dell'applicazione che trovano all'interno del sistema. Al fine di ottenere una stima per un confronto durante i test, viene fatta un'analisi termica e dei consumi della scheda. Infine, vengono descritti i test realizzati per validare il modello progettato, mostrando la struttura del codice e paragonando i dati ricavati dalla scheda con quelli misurati tramite strumentazione professionali.

INDICE

1.1 FORMULA STUDENT	1
1.2 ELETTRONICA DEL VEICOLO	3
1.2.1 POWERTRAIN	3
1.2.2 SISTEMI DI BASSA TENSIONE	4
1.2.3 SISTEMI DI SICUREZZA	4
1.3 REGOLAMENTO	5
1.4 BATTERIA A BASSA TENSIONE.....	6
1.4.1 CONFIGURAZIONE ELETTRICA.....	6
1.4.2 CELLE	7
1.4.3 CARATTERISTICHE ELETTRICHE DEL PACCO BATTERIA	8
1.4.4 MECCANICA DEL PACCO BATTERIA	8
2 BATTERY MANAGMENT SYSTEM DELLA BATTERIA A BASSA TENSIONE.....	10
2.1 SCELTA COMPONENTI.....	10
2.1.1 CIRCUITO INTEGRATO PER IL BMS	10
2.1.2 MICROCONTROLLORE	11
2.2 INTERFACCE	11
2.3 DESCRIZIONE LTC6810.....	12
2.3.1 DESCRIZIONE PIN	12
2.3.2 DIAGRAMMA DEGLI STATI	13
2.3.3 ALIMENTAZIONE	15
2.3.4 ADC	16
2.3.5 COMANDI.....	17
2.4 SCHEMATICO	18
2.4.1 LTC6810_block	18
2.4.2 Cell_interface.....	21

2.4.3 Supply&communication	23
2.5 CONSUMI E ANALISI TERMICA	28
2.6 TERMISTORI	29
2.7 PRINTED CIRCUIT BOARD	30
2.7.1 LAYOUT DELLA PCB	31
3 TEST	34
3.1 TEST VERSIONE 1.0 E AGGIORNAMENTI	34
3.2 TEST VERSIONE 1.1	36
3.3 CODICE	38
3.4 DATI	39
3.4.1 TEST 1	39
3.4.2 TEST 2	39
3.5 ERRORI DI MISURA	40
BIBLIOGRAFIA	41
ELENCO DELLE FIGURE	42

1 INTRODUZIONE

1.1 FORMULA STUDENT

RaceUP Electric è il team di Formula Student dell'Università degli studi di Padova. La Formula Student è una competizione universitaria internazionale che consiste nella progettazione e produzione di un'auto da corsa. I team parteciperanno con le vetture a degli eventi dove dovranno sostenere delle prove per raggiungere il maggior numero di punti. Le prove sono divise in statiche e dinamiche. Per partecipare a queste ultime, sarà necessario superare le ispezioni tecniche (Technical Inspection).



Fig. 1.1.1. Foto della SGe-05

Le prove statiche sono:

- Design Engineering Event dove viene valutato il lavoro fatto nella progettazione, realizzazione e validazione dei sistemi dell'auto
- Business Plan Presentation Event è una presentazione di un modello di business pensato dagli studenti per generare un profitto dall'auto
- Cost and Manufacturing Event valuta la comprensione degli studenti sui costi dei processi di produzione dell'auto

Prima di affrontare gli eventi dinamici l'auto deve essere sottoposta a delle ispezioni tecniche da parte dei giudici per verificarne la sicurezza e il rispetto del regolamento. Queste per un veicolo con powertrain elettrico sono divise in:

- Pre-Inspection: dove viene controllato l'equipaggiamento del pilota, gli estintori e i set di gomme
- L'Accumulator Inspection: prevede l'ispezione del carrello batteria, del caricatore, delle schede all'interno del pacco, segmenti e del resto dei componenti dell'accumulatore.
- Electrical Inspection: dove viene misurata la resistenza di isolamento tra TS e il LVS ground, provando inoltre il funzionamento dell'IMD e viene testato il corretto funzionamento degli altri sistemi elettronici.
- Mechanical Inspection: in cui vengono controllate dimensioni, e campioni di strutture di sicurezza per verificare le proprietà meccaniche di questi
- Tilt Test in cui l'auto viene inclinata di 60° con il pilota più alto all'interno
- Vehicle Weighing: dove il veicolo viene pesato
- Il Rain Test: prevede che l'auto sollevata venga bagnata con getti d'acqua da diverse posizioni per 120 s mentre il TS è attivo. Il test viene passato se l'IMD non viene triggerato per i 120 s in cui viene spruzzata acqua e nei 120 s successivi
- Brake Test: consiste nel bloccare tutte le quattro ruote fermando il veicolo in un rettilineo alla fine di un'accelerazione: dopo aver accelerato il pilota deve spegnere il TS prima di frenare, in modo da usare solo la frenata meccanica.

Una volta superate le Technical Inspections, il team può partecipare agli eventi dinamici, in cui le auto devono percorrere nel miglior tempo possibile dei circuiti di varia lunghezza e forma.

Le prove dinamiche sono:

- Lo Skidpad Event dove la vettura dovrà percorrere 2 paia di cerchi concentrici in un percorso "a otto"
- L'Acceleration Event si svolge su un rettilineo di 75 metri dalla partenza alla fine
- L'Autocross Event è un giro su circuito lungo meno di 1.5 km, che segue delle linee guida descritte nel regolamento dell'evento
- L'Endurance and Efficiency Event consiste in una run di 22 km che si svolge su un circuito che è lungo circa 1 km il quale segue delle linee guida descritte nel regolamento dell'evento, alla fine della quale viene valutata l'energia utilizzata oltre che il tempo impiegato per tagliare il traguardo

1.2 ELETTRONICA DEL VEICOLO

1.2.1 POWERTRAIN

La vettura, chiamata SGe-05, ha un powertrain del pacchetto AMK per formula student formato da 4 motori sincroni DD5-14-10-POW con potenza massima di 35 kW l'uno controllato da un pacchetto di 4 inverter AMKASYN KW26-S5-FSE-4Q. Questi ultimi sono alimentati da una batteria ad alta tensione, visibile in Fig. 1.2.1.1, con le seguenti caratteristiche:

- Celle: 3.7 V, 6350 mAh
- Configurazione: 144s2p
- Tensione nominale: 532.8 V
- Capacità nominale: 12.7 Ah
- Energia totale: 6.7 kWh
- Massima corrente continua di scarica: 210 A
- Peso totale: 47 kg



Fig. 1.2.1.1. Render del pacco batteria di alta tensione

Gli inverter comunicano con la centralina (Main Control Unit) tramite una linea CAN dedicata. La potenza massima su tutti i motori deve essere inferiore a 80 kW.

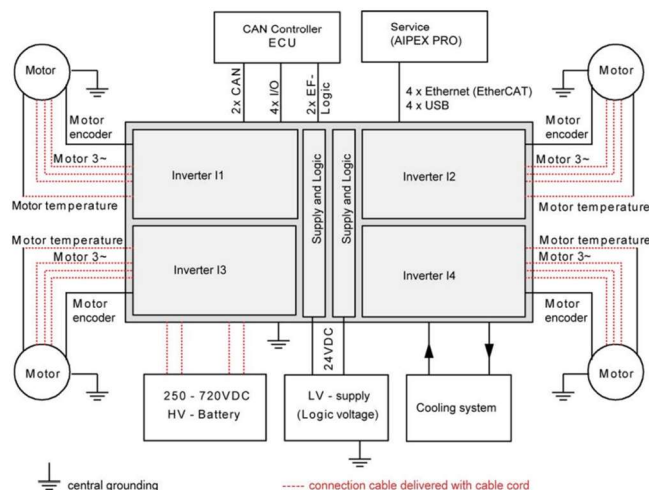


Fig. 1.2.1.2. Schema a blocchi del sistema Inverter-Motori [4]

1.2.2 SISTEMI DI BASSA TENSIONE

Il veicolo possiede una seconda linea CAN, la quale comprende sensori, Inertia Measurement Unit e il **Low Voltage Battery Management System (LV-BMS)**. Collegata a questa, dentro il pacco batteria per il sistema di **High Voltage Battery Management System (HV-BMS)**, vi è una terza linea elettricamente isolata. L'auto ha una batteria a bassa tensione per l'alimentazione di tutti i sistemi elettrici che non comprendono l'erogazione di potenza sui motori.

Per acquisire dati sulla telemetria è stata realizzata una Sensor Monitoring Unit. Questa scheda contiene un sensore di inerzia *MTi-3-8A7G6* e riceve i segnali dai potenziometri delle sospensioni. I dati vengono inviati via CAN alla centralina. La Main Control Unit contiene un alloggiamento per una scheda SD in cui vengono salvati i dati delle run. Inoltre, la centralina pilota un display LCD Nextion Enhanced 4.3" NX4827K043 in SPI.

1.2.3 SISTEMI DI SICUREZZA

Il principale sistema di sicurezza elettrica della vettura è lo **Shutdown Circuit (SDC)**, che riguarda i due **Accumulator Insulation Relays (AIR)**, ossia dei relè normalmente aperti utilizzati per isolare la batteria ad alta tensione dagli inverter. Gli AIR sono alimentati attraverso l'*SDC*. Il circuito in questione, con schema in Fig. 1.2.1.3, è composto da molteplici interruttori controllati da sistemi di sicurezza del veicolo, che in caso di guasto

o funzionamento in zone non sicure, tolgono l'alimentazione alle bobine degli *AIR*. L'*SDC* deve essere alimentato direttamente dalla batteria a bassa tensione.

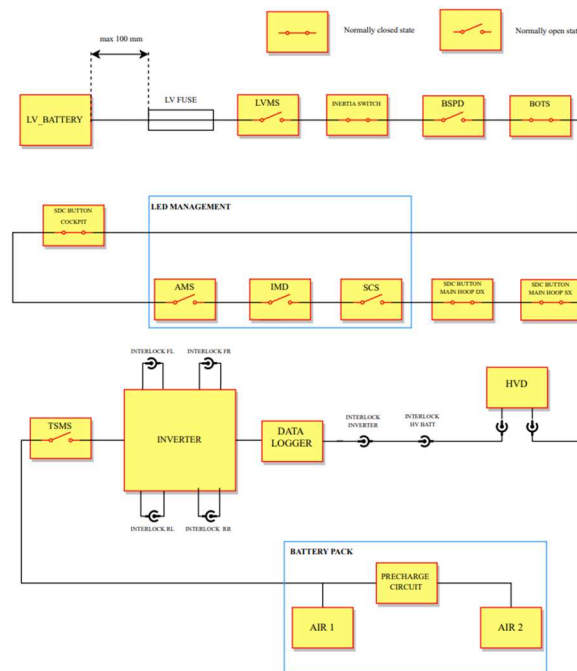


Fig. 1.2.1.3. Schema dello Shutdown Circuit

L'altro principale sistema di sicurezza è la **Tractive System Active Light (TSAL)**, ovvero una luce che indica lo stato del Tractive System.

1.3 REGOLAMENTO

Durante la fase di progettazione e realizzazione dell'auto devono essere rispettati dei limiti, facendo riferimento ad un regolamento specificato nel sito della competizione, in questo caso, quello di Formula Student Germany. La parte riguardante il sistema discusso è la T 11.7 Low Voltage Batteries che rimanda alla T 11.9 System Critical Signal, EV 5.8 Accumulator Management System e ad altre parti di minor interesse per la realizzazione del Battery Management System. Data la chimica delle celle usate nella batteria, diversa dalla LiFePO4, anche la T.11.7.8 deve essere seguita. In particolare, in quest'ultima sono inserite le specifiche da rispettare nella realizzazione della scheda di controllo della batteria, ovvero:

- Deve essere presente un sistema di protezione da sovracorrenti che si interrompe ad una corrente minore della massima erogabile
- Deve avere un sistema di protezione che controlla la temperatura di almeno il 30% delle celle, la quale deve rimanere sotto i 60°C o sotto il valore specificato da datasheet, qualsiasi sia dei due quello minore: se viene superata questa temperatura per più di 1 s la batteria deve essere scollegata. Il sensore di temperatura deve essere in contatto con il terminale negativo della cella oppure sul percorso dove scorre la corrente a meno di 10mm dallo stesso terminale.
- Deve avere una protezione dalla tensione che scollega la batteria se questa esce dal range consigliato da datasheet per più di 500 ms
- Le tensioni e le temperature devono poter essere mostrate facilmente, ad esempio su un laptop

1.4 BATTERIA A BASSA TENSIONE

1.4.1 CONFIGURAZIONE ELETTRICA

La batteria a bassa tensione (Batteria LV) è composta da 12 celle ai polimeri di litio, con chimica $LiCoO_2$ in formato pouch. La configurazione è 6s2p, ovvero 6 serie con 2 paralleli. I paralleli delle celle sono collegati tra loro inserendo i terminali di contatto delle celle (*tabs*) nei fori di una PCB, visibile in Fig. 1.4.1.1, per poi piegarle creando il contatto, i collegamenti delle serie sono realizzati successivamente con dei blocchetti di alluminio a forma di parallelepipedo (*busbars*) che vengono posizionati sui contatti. Le *busbars* e le *tabs* vengono poi bloccate sul circuito stampato tramite delle viti. Sul circuito stampato sono presenti delle piazzole sotto le tab con delle piste che portano le tensioni delle celle ad un connettore. Sono predisposte delle impronte per saldare i termistori, con due piste che portano un terminale al polo negativo (GND) e l'altro ad un connettore. I 2 termistori Negative Thermal Coefficient (*NTC*), una volta saldati, sono infilati sotto le *busbars* per assicurare il contatto con le celle nel punto in cui sono più calde e il mantenimento della posizione. Sono misurate in totale le temperature di 4 terminali, ovvero 2 per resistenza, equivalenti al 33.33% delle celle. Questo valore è maggiore della richiesta minima del regolamento di monitorarne almeno il 30%.

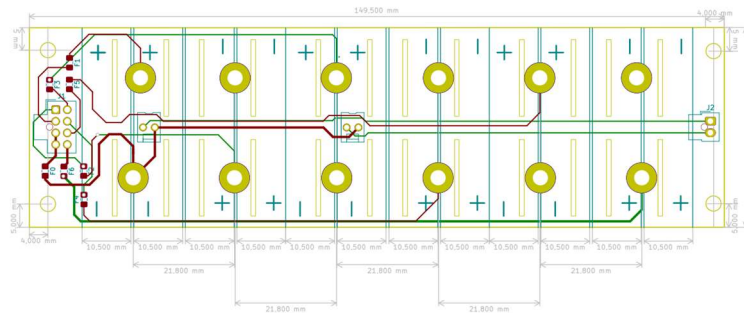


Fig. 1.4.1.1. PCB su cui viene montato il pacco batteria a bassa tensione

1.4.2 CELLE

Le celle utilizzate nella batteria a bassa tensione sono le stesse che formano quella di alta tensione; le loro principali caratteristiche sono:

- Capacità nominale: 6350 mAh
- Tensione massima: $4.2 \text{ V} \pm 0.03 \text{ V}$
- Tensione di cut off: 3.0 V
- Impedenza interna $< 2 \text{ m}\Omega$
- Range di temperatura in carica: $0^\circ\text{C}\sim 45^\circ\text{C}$
- Range di temperatura in scarica: $-20^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$
- Corrente massima di scarica continua: 105 A
- Corrente di picco in scarica: 127 A ($t \leq 2 \text{ s}$)
- Corrente di picco in carica: 25.4 A ($t \leq 1 \text{ s}$)
- Massa: 131 g

La densità energetica di queste celle è abbastanza elevata, hanno una bassa impedenza interna e i 15 C massimi di scarica continua soddisfano abbondantemente la corrente istantanea e continua necessaria per alimentare tutti i sistemi, rendendo queste celle adatte ad un veicolo elettrico.

1.4.3 CARATTERISTICHE ELETTRICHE DEL PACCO BATTERIA

Con questa configurazione possiamo raggiungere 25.2 V e un'energia massima del pacco di:

$$E_{max} = 6 \cdot 4.2 \cdot 6.35 \cdot 2 = 320Wh,$$

il quale ha un'impedenza massima totale di:

$$Z_{max} = \left(\frac{2m\Omega \cdot 2m\Omega}{2m\Omega + 2m\Omega} \right) \cdot 6 = 6m\Omega.$$

L'energia immagazzinata deve essere gestita per percorrere un'endurance che è l'evento dinamico più lungo, dove c'è l'attivazione delle pompe e ventole dei radiatori del sistema di raffreddamento per i 4 inverter che alimentano i motori, e dalla ventola per il pacco batteria di alta tensione.

1.4.4 MECCANICA DEL PACCO BATTERIA

Le celle sono fissate con un dado autobloccante incollato sotto alla PCB con una colla UL94 V-0, per avvitare dalla parte opposta le busbar. Su quest'ultime è agganciato un occhiello di bloccaggio che ferma le viti, in modo da evitare che queste si allentino con le vibrazioni. Sotto la PCB verrà incollato anche un profilo in materiale composito stampato in 3D, per evitare stress meccanico sui terminali, con lo stesso materiale sarà stampato un contenitore da avvitare al circuito stampato per poi fissarlo alla scatola. Sulla parte superiore i contatti saranno ricoperti di Kapton, ovvero un nastro adesivo isolante, per ridurre il rischio di cortocircuiti accidentali. La scatola che contiene la batteria è realizzata in stampa 3D con un filamento UL94 V-0 ed è la stessa che contiene il BMS: i due saranno separati da una parete dello stesso materiale con fori per realizzare il cablaggio. Sulla scatola sono presenti due connettori: uno per segnali e alimentazioni, l'altro di tipo seriale per poter mostrare tensioni e temperature delle celle sul laptop.

La T 11.7.7 viene rispettata utilizzando un fusibile automotive posto dopo il relè che alimenta l'SDC e i circuiti di bassa tensione, il percorso dal polo positivo attraverso cavo-PCB-relè è di 9.7 cm (6 cm di cavo + 3.7 cm di piste). Per la T 11.7.8 che rimanda alla EV 5.8.10 verrà realizzato un apposito connettore in cui si possono interrompere le connessioni in modo da facilitare le ispezioni tecniche.

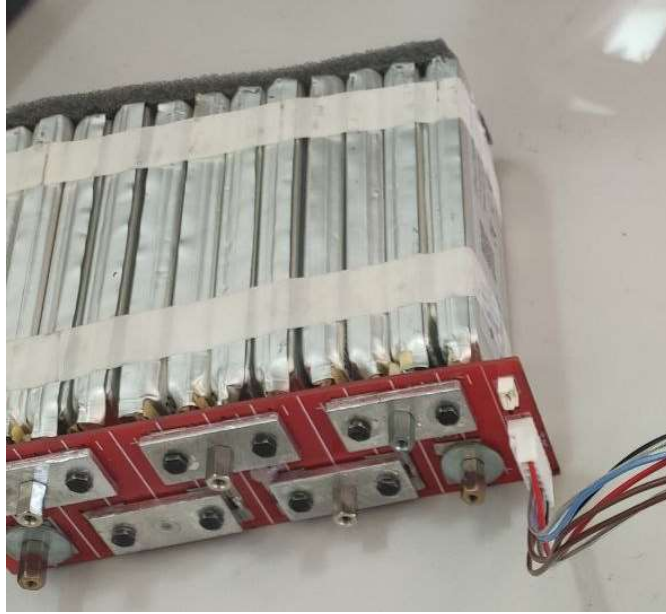


Fig. 1.4.4.1. Foto del vecchio pacco batteria LV assemblato

2 BATTERY MANAGMENT SYSTEM DELLA BATTERIA A BASSA TENSIONE

2.1 SCELTA COMPONENTI

2.1.1 CIRCUITO INTEGRATO PER IL BMS

Per realizzare il *LV-BMS* sono presenti degli integrati sul mercato che hanno diversi numeri di ADC per lettura di celle e temperature. Molti di questi segnalano errore su un pin automaticamente quando la tensione esce dal range di funzionamento della cella, in base alla chimica di questa. Solo pochi componenti hanno una parte di comunicazione digitale: la scelta ricade su uno della serie *BQ7XX* della Texas Instruments e l'*LTC6810* della Analog Devices, gli unici due ad avere una versione per solamente 6 celle. Viene scelto il secondo per la struttura interna molto simile a quella dell'*LTC6811* che nella prossima stagione verrà implementato nel *BMS* della batteria ad alta tensione, utilizzando la comunicazione differenziale isolata isoSPI. L'utilizzo di due integrati della stessa famiglia permette di ridurre il lavoro sulla parte software, avendo gli stessi comandi e registri che variano solo per lunghezza di bit, ma che hanno lo stesso utilizzo in entrambi i componenti. Le principali caratteristiche dell'*LTC6810* sono:

- Lettura di un massimo di 6 celle in serie con un errore totale massimo di 1.8mV.
- Possibilità di scelta fra 8 frequenze di campionamento per la lettura degli ADC.
- Possibilità di bilanciare le celle tramite PWM programmabile con un sistema di MOS interno con una corrente di scarica massima di 150 mA. Questi MOS possono pilotare degli NMOS esterni aumentando questo valore in base alla scelta del componente.
- Consumo in sleep mode molto basso, pari a 4 μ A.
- Comunicazione in SPI con una frequenza di clock massima di 1 MHz.
- Bassa suscettibilità ed emissione di EMI. Questo lo rende adatto ad un ambiente molto rumoroso come quello in cui verrà posta la scheda.
- 4 GPIO che possono essere utilizzate come ADC addizionali per la lettura delle temperature e del sensore di corrente.
- Possiede dei comandi di diagnostica utili per il debug e per verificare lo stato di funzionamento dell'integrato.

Sul mercato sono presenti due versioni, ovvero *LTC6810-1* utilizzabile in daisy chain e *LTC6810-2* che è la versione indirizzabile.

2.1.2 MICROCONTROLLORE

Il microcontrollore (μC) utilizzato per gestire il *LV-BMS* è l'*ATmega32M1* con 32kBytes di memoria flash oppure *ATmega64M1* con 64kBytes di memoria flash (da ora in poi il componente sarà chiamato *ATmegaXXM1*). La scelta di questo componente è stata fatta per il suo ampio utilizzo nei sistemi del team, il suo basso costo, la possibilità di scrivere il codice sull'*IDE Arduino* e di caricarlo tramite un programmatore *USBasp*.

Le principali caratteristiche soddisfano le richieste del sistema:

- SPI da master con frequenza massima CLK/2 Hz, ovvero 4 MHz usando un oscillatore esterno a frequenza massima da datasheet di 8 MHz, quando viene alimentato a 3.3 V. In questa configurazione questo ha lo stesso livello logico di tensione della parte di comunicazione con l'*LTC6810*.
- Il modulo UART utilizzato per visualizzare i dati dell'integrato su un PC e come strumento di debug della scheda.
- Un modulo CAN integrato che può comunicare fino a 1 Mbit/s.

Un altro fattore molto importante nella scelta è la facilità di utilizzo di questo microcontrollore, visto i pochi membri nel team ed il poco tempo a disposizione durante la stagione.

2.2 INTERFACCE

La scheda di Battery Management System della batteria a bassa tensione deve poter mostrare lo stato delle celle in maniera semplice (regola T 11.7.8 punto 5). Questo viene fatto con la comunicazione seriale asincrona UART bidirezionale presente sul microcontrollore in scheda. I due segnali, TX e RX verranno collegati ad una chiavetta USB con interfaccia fisica RS232. Questa doveva essere realizzata su scheda, ma vista l'impossibilità di trovare un integrato con questa applicazione disponibile sul mercato ad un prezzo conveniente, è stato optato per questa più semplice opzione. Un'altra

alternativa è quella di collegare la seriale a quella di una scheda Arduino di cui il team è molto fornito.

Il *LV-BMS* comunica con la Main Control Unit attraverso la linea CAN a 1 Mbit/s dell'auto. Questo invia due pacchetti contenenti le tensioni, temperature e corrente erogata dalla batteria, dati che permettono di ricavare da una tabella di verità presente nella memoria della centralina lo stato di carica da mostrare sul display al pilota.

2.3 DESCRIZIONE LTC6810

2.3.1 DESCRIZIONE PIN

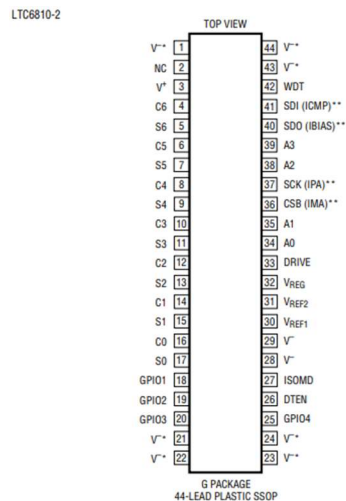


Fig. 2.3.1.1. Pinout dell'*LTC6810-2* [1]

I pin dell'*LTC6810*, visibili nella figura 2.3.1.1, hanno le seguenti funzioni:

- V⁺: pin di alimentazione da collegare al polo positivo della batteria
- V⁻, V^{*}: sono i pin di alimentazione da collegare al polo negativo della batteria (GND).
- C0, ..., C6: sono gli input per le celle.
- S0, ..., S6: sono gli output per il balance/input per la misura ridondante delle celle.
- V_{REF2}: riferimento di tensione utilizzabile per alimentare termistori, da bypassare con un condensatore da 1 μF.

- V_{REF1} : riferimento di tensione degli ADC. Non devono essere collegati carichi DC a questo pin. Da bypassare con un condensatore da 1 μ F
- GPIO1, ..., GPIO4: possono essere usati come input/output digitali o come input analogici con una misura compresa tra V^- e 5 V. GPIO2, GPIO3 e GPIO4 possono funzionare anche come porta I2C o SPI.
- DTEN: abilita il discharge timer se connesso a V_{REG}
- DRIVE: può pilotare la base di un transistor NPN per alimentare l'integrato.
- V_{REG} : input per regolatore a 5 V. Da bypassare con un condensatore da 1 μ F.
- ISOMD: seleziona la modalità dell'interfaccia seriale tra isoSPI con doppietto intrecciato oppure SPI a 4 fili.
- WDT: pin di output del watchdog timer.
- CSB, SCK, SDI, SDO: 4 cavi della comunicazione SPI, con chip select (segnale equivalente a slave select) attivo basso.
- A0, ..., A3: pin di indirizzamento.
- IPA, IMA, IPB, IMB, IBIAS, ICMP: pin per la comunicazione in isoSPI.

2.3.2 DIAGRAMMA DEGLI STATI

- SLEEP STATE

I riferimenti e gli ADC sono spenti. Il watchdog timer e il discharge timer sono disabilitati. Le correnti di alimentazione sono ridotte al minimo. L'isoSPI è in IDLE STATE. Il pin DRIVE è a 0 V. Tutte le macchine di stato sono in DEFAULT STATE. Con un segnale di WAKEUP l'LTC6810 entra in STANDBY STATE.

- STANDBY STATE

I riferimenti di tensione e gli ADC sono spenti. Il Watchdog e il discharge timer sono attivi. Il pin V_{REG} è alimentato a 5.2 V tramite un transistor esterno controllato dal pin DRIVE. In alternativa V_{REG} può essere alimentato da un LDO interno a 4.7 V. Un'altra alternativa è alimentarlo da un regolatore di tensione esterno disabilitando l'LDO interno mettendo DRIVE non connesso. Quando un comando ADC viene ricevuto oppure il bit REFON, nel Configuration Register Group, viene impostato a uno e l'integrato fa una pausa di t_{REFUP} per permettere

ai riferimenti di accendersi, passando in REFUP o MEASURE STATE. Se nessun comando viene ricevuto entro un tempo t_{SLEEP} , l'integrato torna in SLEEP STATE se $DTEN = 0$, oppure entra in EXTENDED BALANCING STATE se $DTEN = 1$.

- REFUP STATE

Per entrare in questo stato il REFON bit del Configuration Register Group deve essere impostato a 1 usando il comando WRCFG. Gli ADC sono spenti, i riferimenti di tensione vengono accesi per permettere agli ADC di iniziare conversioni più velocemente rispetto allo STANDBY STATE. Quando un comando valido per l'ADC viene ricevuto l'integrato va in MEASURE STATE per iniziare la conversione, altrimenti ritorna in STANDBY STATE quando il bit REFON è settato a 0 usando il comando WRCFG. Se non vengono ricevuti comandi validi per un tempo t_{SLEEP} l'*LTC6810* ritorna in SLEEP STATE se $DTEN = 0$ oppure entra in EXTENDED BALANCING STATE se $DTEN = 1$.

- MEASURE STATE

Gli ADC dell'integrato in questo stato fanno conversioni. I riferimenti di tensione e gli ADC sono accesi. Quando un ADC finisce una conversione l'*LTC6810* farà una transizione al REFUP STATE oppure allo STANDBY STATE in base al bit REFON. Si possono velocizzare le conversioni degli ADC impostando il bit $REFON = 1$. Il comando Non-ADC non causa una transizione di stato, solo ADC CONVERSION oppure il comando DIAGN fanno entrare il core in MEASURE STATE.

- EXTENDED BALANCING STATE

Il watchdog timer viene disattivato, il discharge timer è attivo. Potrebbero essere in corso scariche delle celle controllate in PWM. Se il discharge timer è attivo l'*LTC6810* farà una transizione a DTM MEASURE state ogni 30 secondi per misurare la tensione delle celle. Se viene ricevuto un segnale di WAKEUP, l'integrato passerà da EXTENDED BALANCING STATE a STANDBY STATE.

- DISCHARGE TIMER MONITORING STATE (DTM MEASURE STATE)

Il watchdog timer ha finito di contare, ma c'è un monitoraggio attivo in background. $DTMEN = 1$ nel Configuration Register Group. L'*LTC6810* entra in questo stato dall'EXTENDED BALANCING STATE una volta ogni 30 secondi

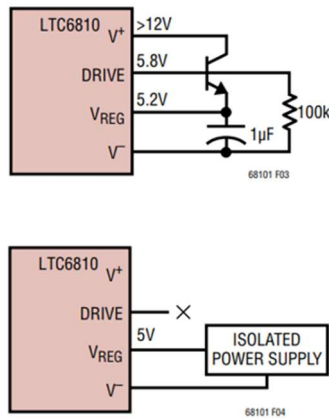


Fig. 2.3.3.1. Schema di alimentazione tramite BJT NPN e tramite DC-DC [1]

2.3.4 ADC

Il bit ADCOPT (CFGR0[0]) nel Configuration Register Group e i bit di selezione della modalità MD[1:0] nel comando di conversione, permettono la scelta tra 8 diverse modalità di operazione a cui corrispondono diverse frequenze di campionamento. Queste ultime permettono di soddisfare ogni esigenza di oversampling ratio (*OSR*), risoluzione e Total Measurement Error (*TME*). I pin GPIO e [S0, S6] possiedono degli ADC con la stessa risoluzione e range di funzionamento, ovvero tra -0.82 V e +5.73 V, dei pin [C0, C6]. Il formato dei dati è 16 bit unsigned integer dove l'LSB rappresenta 100 µV.

Gli ADC hanno *TME* che va da ±1.8 mV, in Normal Mode e frequenze di campionamento più basse, a ±5.5 mV, quando $f_c = 14$ kHz o superiore. Gli errori sono stati misurati con tensioni da 0.5 V a 4.5 V: in questo range di tensioni il *TME* è costante in tutte le modalità. In Fig. 2.3.4.1 la seconda e terza colonna rappresentano la banda del filtro degli ADC a -3 dB e -40 dB.

MODE	-3dB FILTER BW	-40dB FILTER BW	TME SPEC AT 3.3V, 25°C	TME SPEC AT 3.3V, -40°C, 125°C
27kHz (Fast Mode)	27kHz	84kHz	±5.5mV	±5.5mV
14kHz	13.5kHz	42kHz	±5.5mV	±5.5mV
7kHz (Normal Mode)	6.8kHz	21kHz	±1.8mV	±2.4mV
3kHz	3.4kHz	10.5kHz	±1.8mV	±2.4mV
2kHz	1.7kHz	5.3kHz	±1.8mV	±2.4mV
1kHz	845Hz	2.6kHz	±1.8mV	±2.4mV
422Hz	422Hz	1.3kHz	±1.8mV	±2.4mV
26Hz (Filtered Mode)	26Hz	82Hz	±1.8mV	±2.4mV

Note: TME is the total measurement error.

Fig. 2.3.4.1. Tabella con banda e *TME* in funzione della modalità degli ADC [1]

2.3.5 COMANDI

I comandi utilizzati per richiedere all'integrato le misure degli ADC di celle e temperature sono:

- ADCV che restituisce la misura di tutte le sei celle
- ADAX che restituisce la misura delle GPIO e del terminale più negativo

Per entrambi i comandi si può selezionare una tra le otto frequenze degli ADC. Nelle Fig. 2.3.5.1 e 2.3.5.2 t_C indica il tempo di conversione di tutte le 6 celle. MCAL è il bit che indica se è presente la calibrazione alla fine di ogni conversione. t_{SKEW} è il tempo di sincronizzazione degli ADC.

Table 5. Conversion and Synchronization Times for ADCV Command Measuring All Six Cells, SCONV = 0

MODE	CONVERSION TIMES (in μs)							SYNCHRONIZATION TIME (IN μs)
	t_0	t_{1M}	t_{2M}	t_{5M}	t_{6M}	$t_{C,MCAL=0}$	$t_{C,MCAL=1}$	t_{SKEW2}
27kHz	0	57	104	244	291	524	1,106	233
14kHz	0	87	162	390	465	699	1,281	379
7kHz	0	145	279	681	815	1,165	2,328	670
3kHz	0	261	511	1,262	1,513	1,863	3,026	1,252
2kHz	0	494	977	2,426	2,909	3,259	4,423	2,415
1kHz	0	959	1,908	4,753	5,702	6,052	7,215	4,742
422Hz	0	1,890	3,770	9,408	11,287	11,637	12,801	9,397
26Hz	0	29,818	59,624	149,044	178,851	182,692	201,310	149,033

Fig. 2.3.5.1. Tabella con tempo di conversione e di sincronizzazione in funzione della modalità degli ADC, per il comando ADCV [1]

Table 7. Conversion and Synchronization Times for ADAX Command Measuring S0, All GPIOs and 2nd Reference

MODE	CONVERSION TIMES (in μs)								
	t_0	t_{1M}	t_{2M}	t_{3M}	t_{4M}	t_{5M}	t_{6M}	$t_{C,MCAL=0}$	$t_{C,MCAL=1}$
27kHz	0	57	104	151	197	244	291	521	1,103
14kHz	0	87	162	238	314	390	465	695	1,277
7kHz	0	145	279	413	547	681	815	1,161	2,324
3kHz	0	261	511	762	1,012	1,262	1,513	1,859	3,023
2kHz	0	494	977	1,460	1,943	2,426	2,909	3,255	4,419
1kHz	0	959	1,908	2,856	3,805	4,753	5,702	6,048	7,212
422Hz	0	1,890	3,770	5,649	7,529	9,408	11,287	11,634	12,797
26Hz	0	29,818	59,624	89,431	119,238	149,044	178,851	182,688	201,306

Fig. 2.3.5.2. Tabella con tempo di conversione e sincronizzazione in funzione della modalità degli ADC, per il comando ADAX [1]

2.4 SCHEMATICO

Lo schematico realizzato su KiCAD è diviso in 3 blocchi:

- LTC6810_block
- Cell_interface
- Supply&communication

2.4.1 LTC6810_block

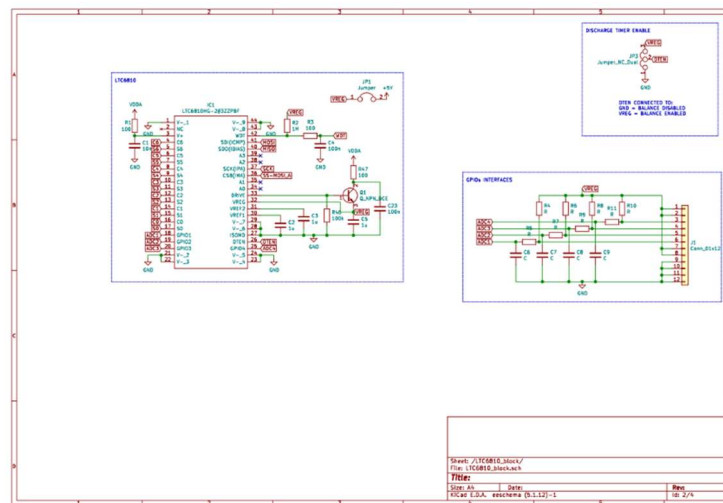


Fig. 2.4.1.1. Schematico contenuto nell'LTC6810_block

Questo blocco contiene:

- Il simbolo dell'integrato con tutte le etichette di connessione.
- Filtri predisposti in caso di utilizzo delle GPIO come ADC, per la lettura di termistori e sensore di corrente.
- Il circuito per l'alimentazione tramite transistor, che può essere bypassato inserendo il jumper JP1, in caso di alimentazione tramite DC-DC esterno.
- Il connettore J1 per le GPIO

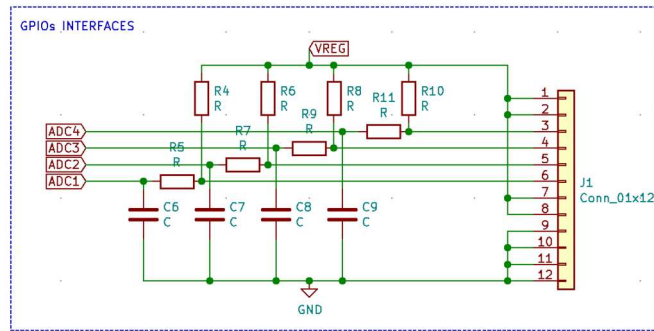


Fig. 2.4.1.2. Schematico delle interfacce tra il connettore J1 e le GPIO

Tra il connettore J1 e le GPIO sono inseriti dei filtri con la possibilità di collegare un pullup, utile nel caso dei termistori. Sono anche predisposti pin per collegare i segnali a GND e VREG.

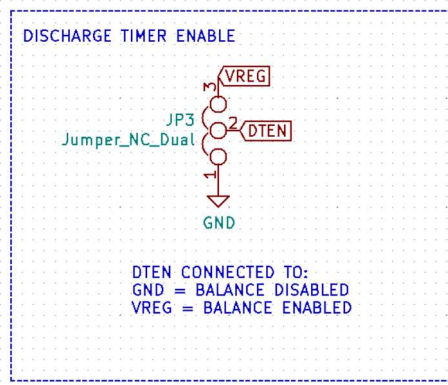


Fig. 2.4.1.3. Schematico del selezionatore di modalità

Il jumper JP3 permette di selezionare la modalità di balance quando DTEN viene connesso a V_{REG} , oppure la modalità normale se DTEN viene collegato a GND.

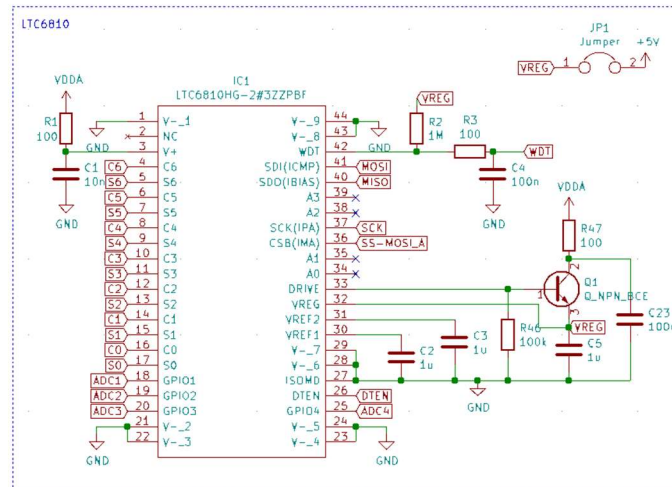


Fig. 2.4.1.4. Schematico con le connessioni dell'*LTC6810*

I due pin dell'integrato dove vengono scambiati i dati tramite comunicazione SPI vengono collegati alle etichette:

- Serial Data Input (SDI) con Master Output Slave Input (MOSI)
- Serial Data Output (SDO) con Master Input Slave Output (MISO)

Il filtro sul pin V^+ , consigliato dal datasheet, oltre a filtrare la tensione di alimentazione, limita la corrente in ingresso all'integrato. Il pin del watchdog timer dell'integrato necessita di un pullup a V_{REG} di 1 M Ω ; il filtro passabasso è inserito per la connessione con l'*ATmegaXXM1*. Quando il watchdog timer scade, il pin va in alta impedenza portando WDT a V_{REG} , il pin altrimenti sarà a livello logico basso.

La parte di alimentazione tramite BJT NPN è realizzata secondo la configurazione a pagina 70 del datasheet, dove R47 e C23 formano un filtro per regolare la tensione sul collettore. R46 è una resistenza di pulldown per il pin DRIVE, che permette all'integrato di lavorare in tutto il range di V^+ : questo non è necessario perché nella applicazione in considerazione $V^+ > 12$ V, non serve quindi attivare l'LDO interno (se 5 V $< V^+ < 12$ V, non sarebbe necessario utilizzare transistor o DC-DC). Il transistor scelto è il *DXT5551P5* che con $V_{CE} = 24$ V può erogare un massimo di circa 300 mA, una corrente sufficiente

per il consumo stimato dell'*LTC6810* di 6.15 mA in MEASURE STATE. Il BJT ha un guadagno in continua h_{FE} maggiore di 100 in tutto l'intervallo temperatura di funzionamento, quindi sempre maggiore di 40, come consigliato da datasheet, per fornire sempre la corrente necessaria. C2 e C3 sono due condensatori di bypass per le tensioni di riferimento degli ADC generate internamente.

Il pin S0 può essere utilizzato in una configurazione a sette celle come pin di balance oppure può effettuare una misura ridondante del polo più negativo della serie di celle. In questa scheda S0 viene connesso a GND, vista la configurazione a sei celle della batteria.

2.4.2 Cell_interface

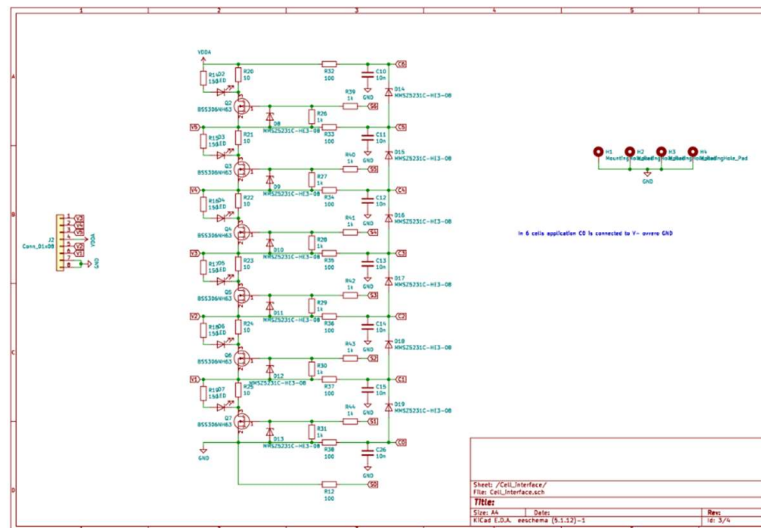


Fig. 2.4.2.1. Schematico contenuto nel blocco Cell_interface

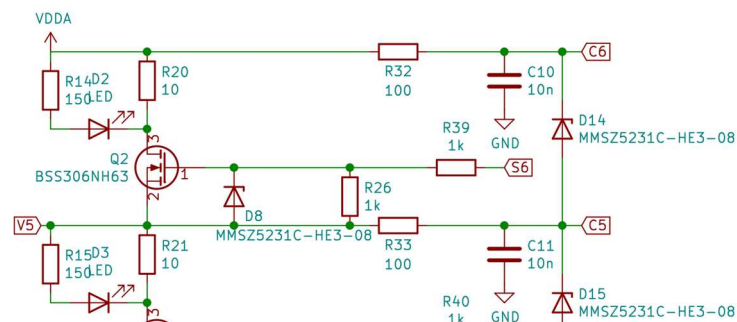


Fig. 2.4.2.2. Schematico dell'interfaccia tra la cella 6 e l'*LTC6810*

In questo blocco è presente lo schema tra i pin dell'integrato e le celle. Per la spiegazione, viene preso in esempio per la numerazione dei componenti il blocco della cella numero 6. Il diodo D14 è uno zener con tensione di breakdown di -5.1 V, usato come protezione da sovratensioni, tra il pin C6 e la cella vi è un filtro passabasso formato da $R32 = 100 \Omega$ e $C10 = 10 \text{ nF}$ che ha una frequenza di taglio di:

$$f_{pb} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = 159155 \text{ Hz.}$$

Questo filtro serve per eliminare il rumore ad alta frequenza che potrebbe influire sulle misure degli ADC. Nel datasheet veniva proposta, oltre a quella utilizzata, un'altra configurazione con filtri differenziali, dove al posto di collegare a GND il condensatore, esso viene connesso al pin C della cella inferiore. I filtri nello schema sono più adatti ad ambienti rumorosi rispetto alla struttura con condensatori differenziali.

L'NMOS Q2, pilotato dal pin S6, se portato in zona resistiva, scaricherà la cella attraverso un resistore in parallelo, sul quale scorrerà una corrente proporzionale al suo valore di resistenza. Questo circuito serve per bilanciare il pacco batteria, portando ogni cella alla stessa tensione: il gate del MOS è protetto da una resistenza serie R39 e uno zener D8 con una tensione di breakdown di -5.1 V. Il pullup R26 permette di avere una tensione a livello logico alto sul gate di Q2, quando gate del NMOS interno all'integrato, corrispondente allo stesso pin, è a livello logico alto. R20 è il resistore di discharge con package SMD 2512. Il mos Q2 è un *BSS306NH63* con $V_{gsthmax} = 2 \text{ V}$, una I_d massima a 100°C di 1.4 A, valore di temperatura che non verrà superato per evitare il deterioramento della PCB, una R_{DSon} trascurabile di $60 \text{ m}\Omega @ V_{GS} = 5 \text{ V}$. Si ha:

$$V_{maxCella} = R20 \cdot I_d = 4.2 \text{ V,}$$

e utilizzando $R20 = 10 \Omega$, viene ottenuta una corrente massima di 420 mA, con una potenza dissipata sul resistore di discharge di 1.764 W da limitare sotto la potenza sopportabile da R20 tramite PWM. Con un resistore da 1 W si dovrà scegliere un duty-cycle percentuale sotto il 56%, questo valore verrà aggiustato empiricamente misurando con una termocamera la temperatura a cui arriva il resistore. In parallelo a R20 c'è la serie

di un led D2 e un resistore R14, utile in debug per avere un riscontro visivo su quali celle stanno scaricando.

J2 è il connettore per l'alimentazione della scheda, su cui vengono portate le tensioni di ogni cella. I 4 mounting hole sono dei fori M3 metallizzati per avvitare la scheda alla scatola e portare a massa le viti in caso queste siano metalliche.

2.4.3 Supply&communication

In questo blocco si trova l'*ATmegaXXM1*, tutta la circuiteria di comunicazione, la parte di alimentazione per il microcontrollore e il relè per l'alimentazione di bassa tensione.

I collegamenti dell'*ATmegaXXM1* con le altre parti dello schematico sono realizzati quasi interamente tramite etichette, in modo da rendere comprensibile lo schematico.

Il filtro sull'alimentazione degli ADC, i condensatori di bypass, la parte del segnale RESET e l'oscillatore esterno seguono i consigli riportati nel datasheet del microcontrollore.

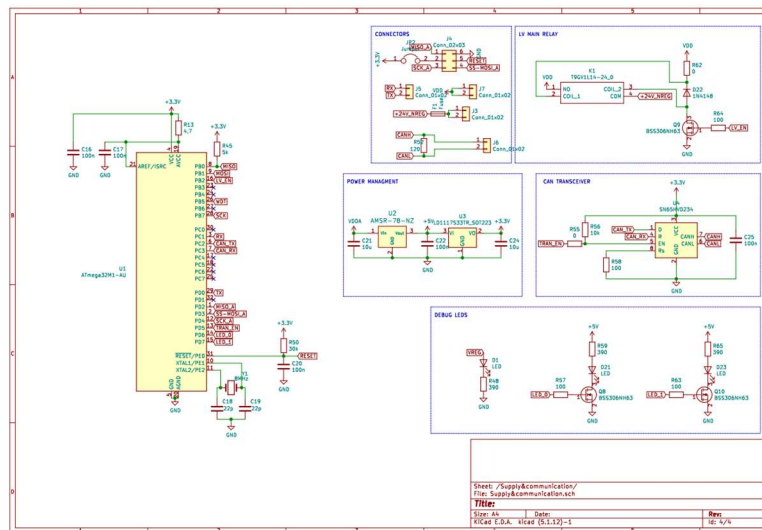


Fig. 2.4.3.1. Schematico contenuto nel blocco Supply&communication

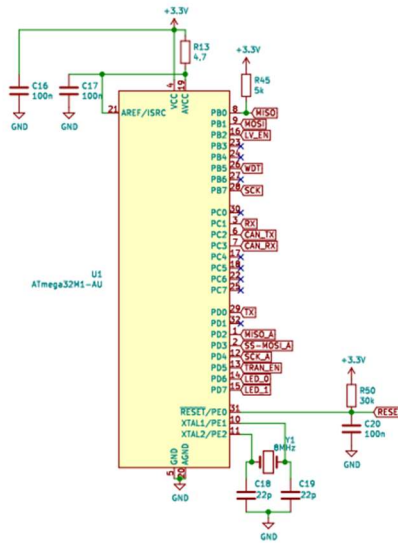


Fig. 2.4.3.2. Schematico con le connessioni dell' *ATmegaXXM1*

Vengono usate entrambe le porte SPI dell' *ATmegaXXM1*. La prima è di comunicazione, con i segnali Master Input Slave Output (MISO), Master Output Slave Input (MOSI), Serial Clock (SCK), Slave Select (SS-MOSI_A). L' *LTC6810* richiede il pullup di 5 kΩ su MISO. La seconda per il caricamento del bootloader e per la scrittura della memoria flash dell' controllore con i segnali MISO_A, SS-MOSI_A, SCK_A. Nonostante il pin di Slave Select sia condiviso con MOSI_A, durante la programmazione, che avviene utilizzando un programmatore USBasp realizzato appositamente per microcontrollori Atmel AVR, il microcontrollore viene resettato entrando in una modalità di scrittura del bootloader, evitando quindi problemi di conflitto su quel pin. Il pin 6 e 7 del microcontrollore, sono connessi al modulo CAN interno che è in grado di inviare e ricevere dati tramite questo protocollo. I pin 3 e 29 vengono utilizzati per realizzare la seriale via software, di fatti questi non corrispondono ai pin dedicati al modulo USART dell' *ATmegaXXM1*, visto che il pin TX è condiviso con lo Slave Select (SS).

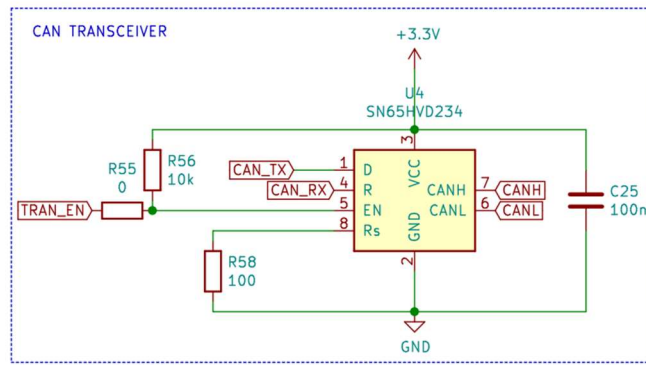


Fig. 2.4.3.3. Schematico del transceiver CAN

La parte CAN TRANSCEIVER contiene il transceiver *SN65HVD23X*. Quest'ultimo realizza l'interfaccia fisica per la comunicazione sulla linea CAN. Nel team verrebbe utilizzato solo l'*SN65HVD234*, ma vista la scarsità di componenti in questo periodo sono stati acquistati altri componenti della stessa famiglia con pinout uguali tranne per il pin 8. Il pull-down R58 seleziona una modalità in base al valore di resistenza, nel caso in considerazione HIGH SPEED, che permette all'integrato di comunicare senza limitazioni di frequenza. R55 e R56 sono da saldare solo in caso si usi un *SN65HVD234* per comandare l'enable dell'integrato, sullo stesso pin dell'*SN65HVD231* invece si trova $V_{REF} = V_{CC}/2$ che non viene utilizzato.

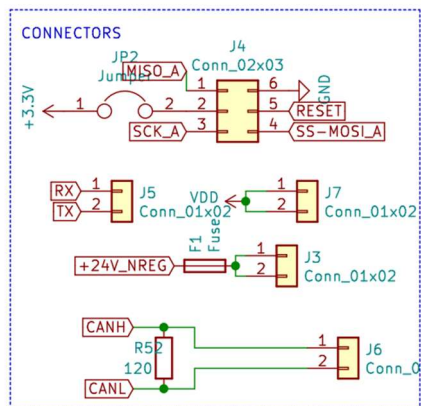


Fig. 2.4.3.4. Schematico contenente i connettori del blocco

I connettori sono:

- Due *Molex Nano-fit* J5 e J7, per la seriale e per la linea CAN rispettivamente. Saldando R52 è possibile inserire la terminazione della linea di 120 Ω .
- Due *Mini-fit_Jr* J7 e J3, da due contatti con un rating di 13 A l'uno per un totale di 26 A, inoltre c'è il fusibile con corrente di interruzione di 20 A per il percorso di corrente della batteria a bassa tensione (la corrente massima in normale funzionamento, misurata nel sistema nell'auto della scorsa stagione, è di 18A).
- Il connettore della porta di programmazione J4. Il jumper JP2 è posto tra l'alimentazione a 3.3 V della scheda e la piazzola dove verrà posto il programmatore: questo per evitare di alimentare U2 dal suo output quando la scheda non è alimentata, ottenendo sull'input tensioni diverse da quelle in normale funzionamento.

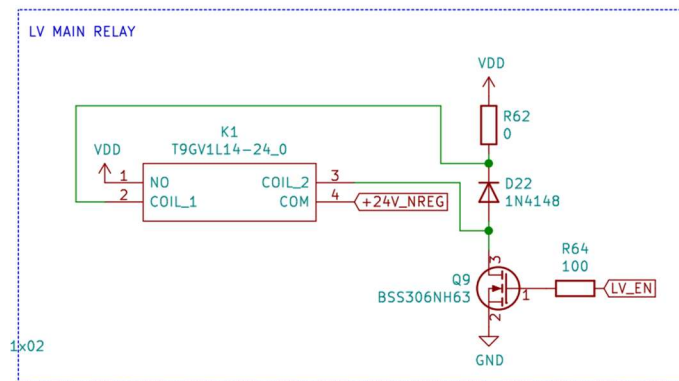


Fig. 2.4.3.5. Schematico con il relè di potenza della scheda

Nella parte LV MAIN RELAY, l'NMOS *BSS306NH63* permette la chiusura e l'apertura del contatto del relè. Il gate di Q9 è pilotato dal segnale LV_EN connesso al microcontrollore, ed è protetto dalla resistenza R64. Il diodo di ricircolo D22 è un *1N4148*, che può sopportare una tensione inversa massima di 75 V e R62 per limitare la corrente che attraversa la bobina. Come relè è stato scelto un *T9GV1L14-24_0* con tensione nominale della bobina di 24 V e corrente nominale del contatto di 30 A, per il consumo ridotto di corrente. Con relè della stessa serie con bobina a 5 V si avrebbe una resistenza della bobina al caso peggiore (28 Ω con tolleranza del 10%) di 25.2 Ω , ottenendo una corrente continua a regime attraverso l'induttanza di 178 mA, mentre per la versione a 24 V la resistenza al caso peggiore è (640 Ω con tolleranza del 10%) di 576

Ω ottenendo quindi una corrente di 41.6 mA. R62 è predisposta per un eventuale limitazione ulteriore di questa corrente. La bobina ha una tensione di chiusura di 18V, che è il valore minimo a cui si può scendere con la tensione dell'intera serie di celle.

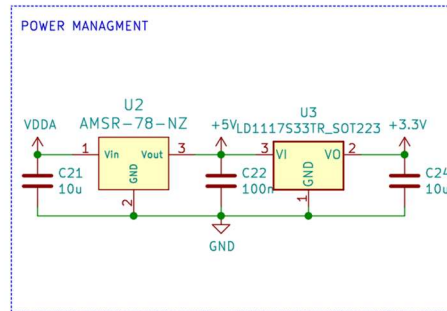


Fig. 2.4.3.6. Schematico della parte di alimentazione della scheda

La parte di POWER MANAGMENT è formata da 2 principali componenti: il DC-DC *AMSR-7805-NZ* per l'alimentazione a 5 V con input [6.5, 32] V, e il regolatore lineare *LD1117S33* per quella a 3.3 V.

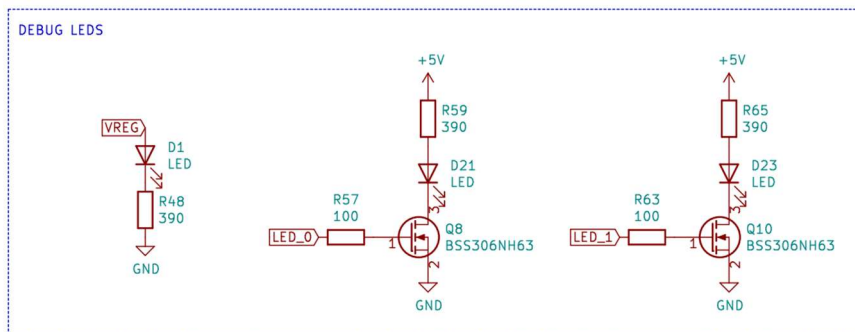


Fig. 2.4.3.7. Schematico con i led di debug e di alimentazione

La parte DEBUG LED contiene due LED comandati dal microcontrollore e un LED connesso all'uscita del DC-DC, in modo da vedere quando la scheda è alimentata.

2.5 CONSUMI E ANALISI TERMICA

Nella tabella sono riportati i componenti con i loro consumi, riportando la corrente al caso pessimo e la tensione a cui operano. Le parti non menzionate hanno un consumo trascurabile:

COMPONENTE	CORRENTE MASSIMA [mA]	TENSIONE [V]
LTC6810	6.1	5
ATmegaXXM1	10	3.3
SN65HVD23X	17	3.3
LED (x3)	Circa 6	5

Fig. 2.5.1. Consumi dei principali componenti

L'LDO ha quindi corrente in output al caso peggiore di:

$$I_o(LDO) = I_{\mu C} + I_{TRANSCIVER} = 27 \text{ mA},$$

la potenza dissipata dal dispositivo è quindi:

$$P_D = (V_i - V_o) \cdot I_o - V_i \cdot I_Q = 94.9 \text{ mW},$$

dove $V_i = 5 \text{ V}$, $V_o = 3.3 \text{ V}$ e $I_Q = 10 \text{ mA}$.

Moltiplicando la potenza per l'impedenza termica giunzione-ambiente di $110 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$ viene ricavata la variazione di temperatura:

$$\Delta T(LDO) = P_D \cdot R_{thJA} = 10.44^\circ\text{C}.$$

La corrente in input al regolatore viene ricavata dalla somma:

$$I_i(LDO) = I_Q(LDO) + \frac{P_o(LDO)}{V_i(LDO)} = 44.8 \text{ mA}.$$

Per il DC-DC, la corrente in output è data dalla corrente totale in input al regolatore da 3.3 V e il consumo dei dispositivi alimentati a 5 V:

$$I_o(DC - DC) = I_i(LDO) + I_{LED} + I_{LTC} = 56.9 \text{ mA},$$

la potenza d'uscita è quindi:

$$P_o(DC - DC) = I_o(DCDC) \cdot 5 = 284.5 \text{ mW}.$$

La potenza dissipata dal dispositivo è la somma del prodotto tra corrente quiescente con tensione d'ingresso massima del DC-DC di 25.2 V, e la potenza persa nella conversione, dove 0.86 è l'efficienza di conversione del *AMSR-7805-NZ*:

$$P_D(DC - DC) = P_o(DC - DC) \cdot \frac{1 - 0.86}{0.86} + V_i \cdot I_Q = 222.71 \text{ mW}.$$

L'impedenza termica per il DC-DC è di $85 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$. L'innalzamento della temperatura del componente è:

$$\Delta T(DC - DC) = P_D \cdot R_{thJC} = 18.93^\circ\text{C}.$$

Le temperature raggiunte dai componenti, scegliendo come temperatura ambiente al caso pessimo di 40°C rimangono negli intervalli consigliati nei datasheet:

$$T_{MAX}(DC - DC) = 85^\circ\text{C} < T_{AMAX} + \Delta T(DC - DC) = 58.93^\circ\text{C}$$

$$T_{MAX}(LDO) = 150^\circ\text{C} < T_{AMAX} + \Delta T(LDO) = 50.44^\circ\text{C}$$

2.6 TERMISTORI

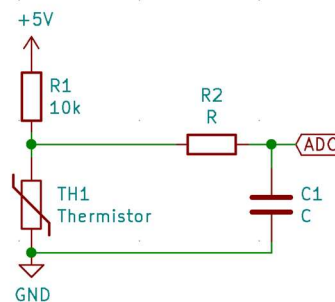


Fig. 2.6.1. Schematico della connessione tra termistori e ADC delle GPIO

I due termistori che misurano la temperatura delle celle sono dei *JT Thermistor 103 JT-025* da $10 \text{ k}\Omega$ a 25°C , con coefficiente termico negativo, questi hanno un rivestimento isolante che permette il loro posizionamento sotto le *busbar* della batteria. La formula della resistenza in funzione della temperatura è:

$$R_{NTC}(T) = R_0 \cdot \exp\left(B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right),$$

Dove R_0 è il valore di resistenza a 25°C, il B value è di 3435K±1% e T_0 è 25°C.

La temperatura ha equazione:

$$T = \frac{T_0 \cdot B}{T_0 \cdot \ln\left(\frac{R_{NTC}}{R_0}\right) + B},$$

dove il valore di resistenza del termistore è dato dalla lettura della tensione tramite l'integrato e vale:

$$R_{NTC} = R1 \cdot \frac{V_{NTC}}{5 - V_{NTC}},$$

La scheda è realizzata in un'unica copia: un'analisi statistica per ricavare l'errore massimo nel calcolo di R_{NTC} in base alla tolleranza di lavorazione del ±10% di R1, sarebbe dunque superfluo. Il valore misurato del resistore saldato è così inserito nell'algoritmo al fine di ottenere la migliore accuratezza possibile. In questo modo viene eliminata la fonte di errore potenzialmente maggiore.

La soglia superiore in scarica scelta è di 55°C.

2.7 PRINTED CIRCUIT BOARD

La PCB del *LV-BMS* è stata disegnata su *pcbnew* di *KiCAD*, ed è realizzata su quattro strati per gestire al meglio il tracciamento delle piste, ottenendo un piano di massa che copre completamente la PCB, schermando la scheda nel miglior modo possibile. I 4 strati permettono di ridurre le dimensioni della scheda e della scatola che conterrà il sistema batteria-BMS. Inoltre, tutte le piazzole sono sullo strato superiore in modo da poter saldare la scheda nel forno *reflow* con pasta saldante, facilitando l'installazione dell'*LTC6810* e dell'*ATmegaXXMI*, che si prestano poco ad essere saldati a mano. Gli strati sono:

- Front (rosso): segnali
- In1 (giallo): alimentazioni
- In2 (viola): GND

- Back (verde): segnali

I package scelti sono quasi tutti **Surface Mounting Device (SMD)** per le impedenze parassite minori rispetto ai componenti **Through Hole Technology (THT)**, i quali inoltre sono più ingombranti. Gli elementi passivi hanno tutti package 1206, vista la grande quantità presente nel magazzino del team e la facilità con cui si può eventualmente sostituire saldando a mano uno dei componenti. Gli unici resistori con package diverso sono quelli di balance, che sono 2512, per avere maggiori valori di potenza dissipabile.

2.7.1 LAYOUT DELLA PCB

I componenti sono divisi in 3 blocchi, ovvero parte analogica, parte digitale e parte di potenza. Questa divisione spaziale riduce al minimo l'impatto delle correnti di ritorno della parte analogica, che possono interferire con la parte digitale, inducendo a fluttuazioni del ground. Il ground analogico potrebbe essere diviso da quello digitale completamente, oppure collegandoli in un punto come in Fig. 2.7.1.1, ma il *routing* delle piste sarebbe risultato più complicato, dovendo evitare di tracciare piste di comunicazione sopra la divisione tra i due piani, altrimenti verrebbero creati dei percorsi di ritorno con una grande induttanza, la quale irradierebbe **ElectroMagnetic Interference (EMI)**.

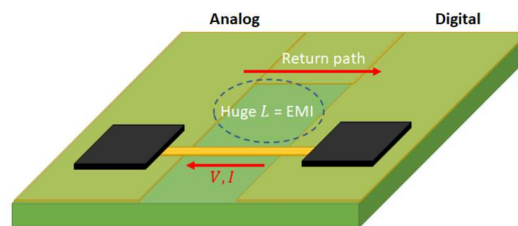


Fig. 2.7.1.1. Esempio di pista sulla divisione tra GND analogico e digitale [2]

I condensatori di bypass per le alimentazioni degli integrati sono posti il più vicino possibile ai rispettivi pin, come mostrato in Fig. 2.7.1.2, cercando di rendere le piste di connessione all'alimentazione e ground simmetriche: questo evita di creare lunghi percorsi di ritorno con grandi induttanze.

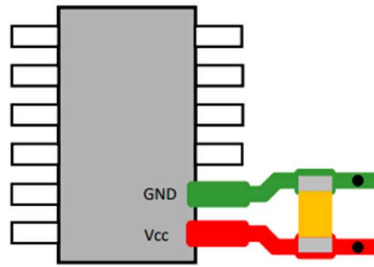


Fig. 2.7.1.2. Esempio di una buona connessione di un condensatore di bypass [3]

La parte del relè di potenza non viene spaziata troppo dal resto della circuiteria, a causa della larghezza della scheda, che non poteva essere incrementata a causa di una copertura ignifuga, che si è deciso di riutilizzare in questa stagione mettendo un vincolo sulle dimensioni. Questo non causa un innalzamento eccessivo delle temperature, grazie alle estese piazzole di rame, realizzate appositamente per dissipare il calore. Per avere una stima della larghezza della traccia necessaria è stato usato lo strumento di calcolo di *KiCAD*, che segue lo standard “*IPC-2221B Generic Standard on Printed Board Design*” in cui è stata inserita una corrente che attraversa il conduttore di 20 A e un incremento di temperatura massimo di 11°C, ottenendo una larghezza delle piste sugli strati esterni consigliata di 17.6 mm. Nella Fig. 2.7.1.3 è riportata la schermata del calcolatore. Visto che le piazzole in considerazione hanno una larghezza di 9 mm, inoltre, sono su entrambi gli strati esterni della PCB, viene considerata come larghezza della pista 18 mm.

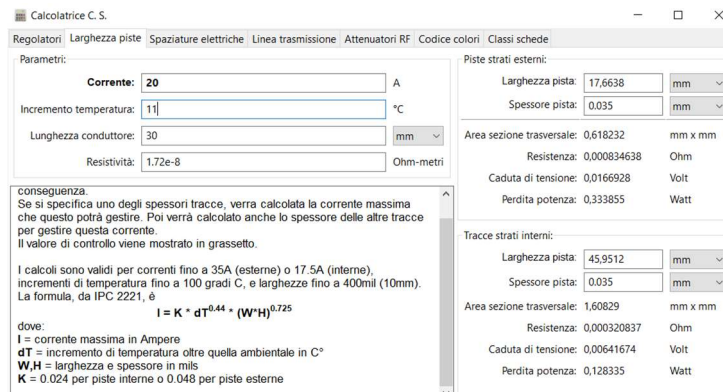


Fig. 2.7.1.3. Schermata dello strumento di calcolo per la larghezza piste di *KiCAD*

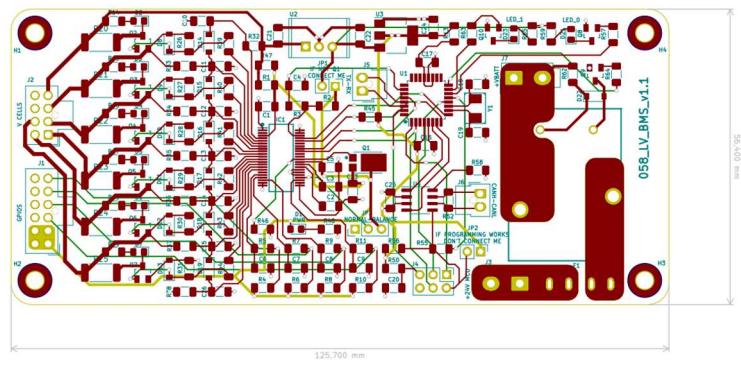


Fig. 2.7.1.4. Piste sui lati Front, In1 e Back

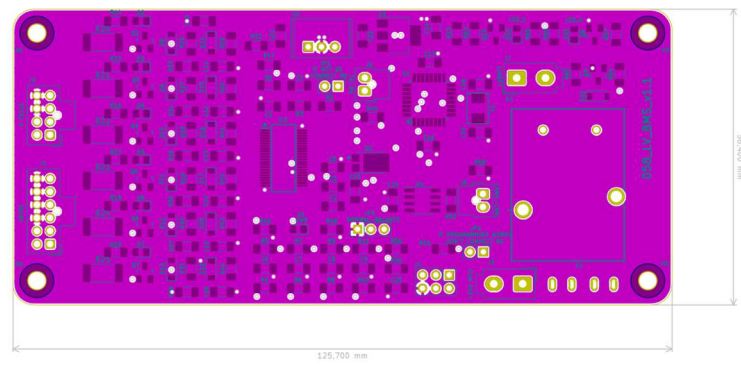


Fig. 2.7.1.5. Piano di massa In2

3 TEST

La scheda ha due versioni. La prima, chiamata *RACE_UP_058_LV_BMS v1.0* presentava problemi nella comunicazione SPI tra *LTC6810* e *ATmegaXXM1*. Per questo motivo è stata realizzata la seconda versione: *RACE_UP_058_LV_BMS v1.1*.

Il presente elaborato nello specifico tratta la versione 1.1 e gli aggiornamenti apportati alla prima per realizzare la definitiva.

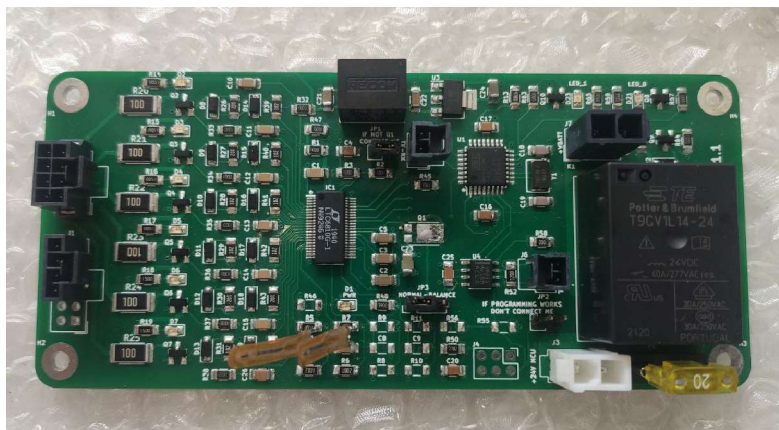


Fig. 3.1. *LV_BMS* versione 1.1

3.1 TEST VERSIONE 1.0 E AGGIORNAMENTI

La funzione TX della comunicazione UART e SS della SPI si trovano sullo stesso pin del microcontrollore, perciò, nella prima versione il SS veniva realizzato su un altro pin modificando la libreria SPI. Durante i primi test, comunicazione tra μC e *LTC6810* non funzionava mentre la UART sì. È stato analizzato il segnale SS sull'oscilloscopio trovando un effetto capacitivo sul fronte di discesa, che nonostante l'abbassamento della frequenza di comunicazione, risultava comunque troppo elevato. Nella versione 1.1 è stato scelto di utilizzare i pin nativi SPI dell'*ATmegaXXM1* per la comunicazione con l'*LTC6810*, mentre per la seriale due pin digitali a scelta con RX che supporti interrupt. La comunicazione seriale realizzata in questo modo necessita di una apposita libreria nel codice.

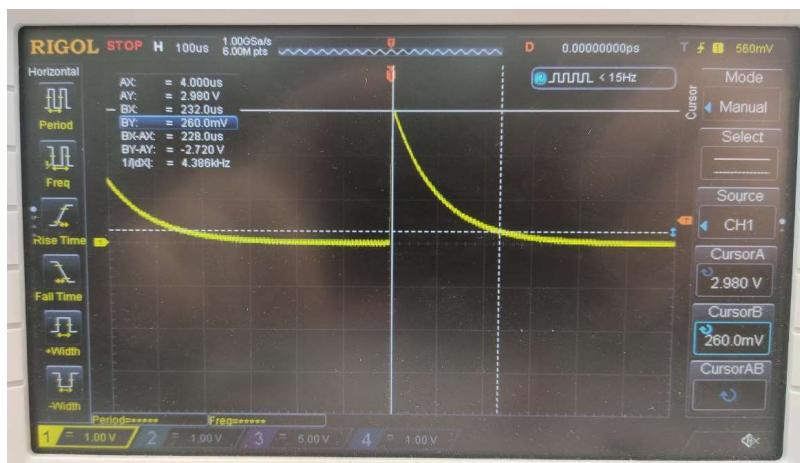


Fig. 3.1.1. Foto del segnale SS della versione 1.0 visualizzato sull'oscilloscopio

Nella versione 1.1 è stata introdotta la possibilità di scegliere se alimentare l'*LTC6810* tramite transistor NPN oppure tramite DC-DC. Nel Test con l'alimentazione tramite transistor, l'alimentatore indicava un consumo elevato di potenza da parte della scheda di 1.2 W, ovvero circa 50 mA a 24 V. La temperatura a regime del BJT e di R47 era di circa 60°C, anche quella dell'integrato si avvicina a quel valore. Per questioni di tempo, è stata modificata l'alimentazione, utilizzando la più semplice e già validata configurazione con DC-DC.

Nella versione 1.1 è stato modificato il modo in cui l'integrato viene messo in balance: prima questo accadeva pilotando tramite il μC un MOS che portava DTEN a V_{REG} oppure a GND, mentre nell'ultima versione, per evitare comportamenti inaspettati durante la scrittura del bootloader e il caricamento del codice, la tensione sul pin DTEN viene impostata usando un jumper.

Nella prima versione della scheda, dopo qualche test, i pin del DC-DC si sono cortocircuitati. Sostituendo quest'ultimo, sui pin dell'integrato venivano trovate tensioni di riferimento per gli ADC, tensione analogica e digitale:

$$V_{REF1} = 4.633 \text{ V}, V_{REGA} = 3.4617 \text{ V e } V_{REGD} = 2.1570 \text{ V},$$

mentre i valori dovrebbero essere rispettivamente di circa 3 V, 5.1 V e [2.7, 3.6] V. L'integrato era quindi danneggiato. I possibili problemi trovati sull'alimentazione erano due: il primo è stato riscontrato dopo misure fatte sulla versione 1.0 dove durante la

programmazione, a scheda non alimentata, l'*USBasp* imponeva i 3.3 V, e sui pin del DC-DC si trovavano:

$$V_{IN} = 2.5 \text{ V e } V_{OUT} = 2.185 \text{ V,}$$

e anche sui rimanenti pin dell'*LTC6810* venivano trovate tensioni molto basse rispetto a quelle indicate nel datasheet.

Il secondo possibile problema era la divisione della tensione del polo positivo della batteria in due connettori separati: uno andava a V^+ , l'altro alimentava il DC-DC, quindi V_{REG} . Durante i test l'alimentazione di queste due parti non era stata fatta contemporaneamente, questo potrebbe aver messo l'integrato in condizioni di lavoro non previste.

Nella seconda versione è stato aggiunto un jumper JP2, il quale permette di scollegare il pin di 3.3 V del programmatore. Se scollegato il microcontrollore può essere programmato solo a scheda alimentata. L'alimentazione di V^+ e del DC-DC ora condividono la stessa pista.

3.2 TEST VERSIONE 1.1

Dopo aver saldato i componenti su scheda, è stato controllato con il multimetro, se fossero presenti eventuali continuità non previste tra i diversi pin di alimentazione, causate dal processo di assemblaggio. Il test viene fatto con l'*LTC6810* con tensioni sui pin C nell'intervallo di funzionamento delle celle, ovvero tra 3 V e 4.2 V: queste sono realizzate su breadboard tramite un partitore di 6 resistenze in serie dello stesso valore nominale, con tolleranza di lavorazione del 10%. Dopodiché la scheda è stata alimentata tramite un *RIGOL DP832* a tensione costante di 25.2 V e 200 mA di corrente massima. Quest'ultimo mostra corrente e potenza in output, utili per valutare il corretto funzionamento sulla base delle stime fatte su carta. Durante la prima accensione, la temperatura dei componenti è stata monitorata con una termocamera *THT45* per interrompere l'alimentazione in caso di surriscaldamento. I componenti della scheda dopo qualche minuto, con T_{AMB} di circa 28°C, hanno raggiunto temperature:

$$T_{LTC6810}=35^{\circ}\text{C}, T_{LDO}= 37.8^{\circ}\text{C}, T_{DC-DC}=40.5^{\circ}\text{C}, T_{ATMEGAXX1}=35^{\circ}\text{C}, T_{SN65HVD23X}=37^{\circ}\text{C}$$

valori che si avvicinano a quelli calcolati. La potenza erogata dall'alimentatore è di 250 mW, quindi la corrente in output era di 10-20 mA (sull'alimentatore da banco la risoluzione è di 10 mA e 10 mW). Dopo aver controllato le tensioni V_{REG} e V_{OUTLDO} a scheda è rimasta alimentata per qualche minuto, poi sono state controllate nuovamente temperature, tensioni e corrente assorbita, ritrovando valori simili a quelli iniziali. Il passaggio successivo è stato il caricamento del *bootloader* e del codice tramite il programmatore *USBasp*; la seriale della scheda collegata ad una chiavetta *FTDI*, connessa a sua volta al laptop, permette di leggere i dati inviati dal microcontrollore, attraverso il monitor seriale di *Arduino*. I messaggi sulla linea CAN sono stati visualizzati tramite l'analizzatore CAN *Kvaser*. Non sono stati ricevuti error frame, e solo alcuni byte variavano. Questo non permette di affermare che la comunicazione sia corretta, ma in prima analisi il sistema sembra funzionare. Per questione di tempistiche e priorità (la comunicazione delle tensioni alla centralina non è necessaria per il funzionamento dell'auto), non sono stati calcolati i valori contenuti nei pacchetti, i quali sono stati valutati una volta collegata la scheda alla centralina in auto, la quale riceveva gli stessi valori letti in seriale.

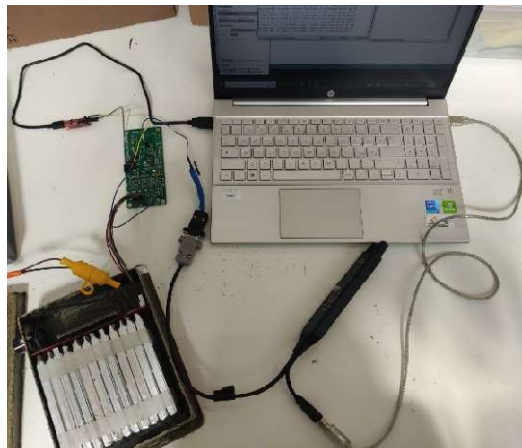


Fig. 3.2.1. Foto del test con *LV_BMS* collegato alla batteria a bassa tensione



Fig. 3.2.2. Foto del sistema completo di batteria e BMS, nella scatola stampata in 3D.

3.3 CODICE

Sleep Mode:

- Il pin che comanda il relè viene impostato basso, tenendo aperto il contatto
- Il microcontrollore non esegue altre azioni, l'*LTC6810* entra quindi in SLEEP STATE

Normal Mode:

- Il microcontrollore sveglia l'*LTC6810*, inviando dei pacchetti tramite SPI, in attesa della risposta dell'integrato, leggendo lo stato della linea di comunicazione dai suoi registri di stato.
- Viene utilizzato il comando ADCV per far iniziare la conversione delle tensioni di tutte le celle (CH = 000) con gli ADC in Normal Mode (ADCOPT(CFGR0[0]) = 0, MD = 10)
- Le altre operazioni sono bloccate finché gli ADC finiscono le conversioni
- Quando l'integrato finisce le conversioni, vengono letti i registri con le tensioni delle celle tramite il comando RDCV
- I valori nei registri vengono convertiti e scalati in decimale. I dati vengono stampati in seriale e inviati sulla linea CAN; nel ciclo dove vengono letti i registri delle celle è inserito un if che in caso di un valore fuori dall'intervallo [3, 4.2] V, apre il relè viene, che rimane chiuso altrimenti.

La stessa procedura per la lettura delle celle viene applicata per la lettura dei termistori.

La Balance Mode verrà implementata e testata in futuro per questioni di tempo.

3.4 DATI

3.4.1 TEST 1

Partitore di 6 resistori con valore $15\text{ k}\Omega \pm 10\%$

Le tensioni sul partitore e sui termistori, lette tramite multimetro sono:

C1 = 3.664 V, C2 = 3.678 V, C3 = 3.706 V, C4 = 3.682 V, C5 = 3.661 V, C6 = 3.592 V,
GPIO1 = 2.480 V, GPIO2 = 2.465 V

Le tensioni inviate dall'integrato sono:

C1 = 3.638 V, C2 = 3.664 V, C3 = 3.685 V, C4 = 3.665 V, C5 = 3.649 V, C6 = 3.554 V,
GPIO1 = 2.454 V, GPIO2 = 2.455 V

Errori:

E1 = 28 mV, E2 = 14 mV, E3 = 21 mV, E4 = 17 mV, E5 = 12 mV, E6 = 38 mV, ET1 =
26 mV, ET2 = 10 mV

3.4.2 TEST 2

Batteria LV collegata

Le tensioni delle celle e dei termistori, lette tramite multimetro sono:

C1 = 3.765 V, C2 = 3.768 V, C3 = 3.759 V, C4 = 3.778 V, C5 = 3.752 V, C6 = 3.794 V,
GPIO1 = 2.480 V, GPIO2 = 2.472 V

Le tensioni inviate dall'integrato sono:

C1 = 3.752 V, C2 = 3.766 V, C3 = 3.759 V, C4 = 3.777 V, C5 = 3.752 V, C6 = 3.782 V,
GPIO1 = 2.469 V, GPIO2 = 2.473 V

Errori:

E1 = 13 mV, E2 = 2 mV, E3 = 0 mV, E4 = 1 mV, E5 = 0 mV, E6 = 12 mV, ET1 = 11
mV, ET2 = 1 mV

3.5 ERRORI DI MISURA

Gli errori di misura massimi ritrovati nel TEST 2 sulla cella 1 e sulla cella 6, sono circa 4 volte quelli massimi dichiarati sul datasheet di ± 3.1 mV. Per migliorare la misura potrebbe essere utile cambiare il layout delle piste, rendendole più simmetriche. Ridurre le resistenze sui filtri d'ingresso agli ADC dei pin [C1, C6] potrebbe abbassare l'offset di tensione, ma la caduta di tensione ai capi su di esse è trascurabile. Realizzando uno sweep di tensione, da 18 V a 25.2 V, sul partitore con la configurazione del TEST 1, l'errore di misura rimane circa costante. Quest'ultimo è quindi dovuto ad un offset di tensione, rimovibile via software.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Analog Devices. LTC6810 Datasheet. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6810-1-6810-2.pdf>
- [2] “High-Speed PCB Design Guide” Sierra Circuits Inc., 2020
- [3] “WE - EMC_Designtips”, Wurth Elektronik, 2019
- [4] AMK. AMKASYN KW26-S5-FSE-4Q. URL: https://amk-group.com/amk-dokucd/dokucd/FSE/en/content/resources/pdf-dateien/pdk_205481_kw26-s5-fse-4q_en.pdf

ELENCO DELLE FIGURE

Fig. 1.1.1. Foto della SGe-05	1
Fig. 1.2.1.1. Render del pacco batteria di alta tensione.....	3
Fig. 1.2.1.2. Schema a blocchi del sistema Inverter-Motori [4].....	4
Fig. 1.2.1.3. Schema dello Shutdown Circuit.....	5
Fig. 1.4.1.1. PCB su cui viene montato il pacco batteria a bassa tensione.....	7
Fig. 1.4.4.1. Foto del vecchio pacco batteria LV assemblato.....	9
Fig. 2.3.1.1. Pinout dell' <i>LTC6810-2</i> [1].....	12
Fig. 2.3.2.1. Diagramma degli stati dell' <i>LTC6810</i> [1].....	15
Fig. 2.3.3.1. Schema di alimentazione tramite BJT NPN e tramite DC-DC [1]	16
Fig. 2.3.4.1. Tabella con banda e <i>TME</i> in funzione della modalità degli ADC [1].....	16
Fig. 2.3.5.1. Tabella con tempo di conversione e di sincronizzazione in funzione della modalità degli ADC, per il comando ADCV [1].....	17
Fig. 2.3.5.2. Tabella con tempo di conversione e sincronizzazione in funzione della modalità degli ADC, per il comando ADAX [1]	17
Fig. 2.4.1.1. Schematico contenuto nell' <i>LTC6810_block</i>	18
Fig. 2.4.1.2. Schematico delle interfacce tra il connettore J1 e le GPIO.....	19
Fig. 2.4.1.3. Schematico del selezionatore di modalità	19
Fig. 2.4.1.4. Schematico con le connessioni dell' <i>LTC6810</i>	20
Fig. 2.4.2.1. Schematico contenuto nel blocco <i>Cell_interface</i>	21
Fig. 2.4.2.2. Schematico dell'interfaccia tra la cella 6 e l' <i>LTC6810</i>	21
Fig. 2.4.3.1. Schematico contenuto nel blocco <i>Supply&communication</i>	23
Fig. 2.4.3.2. Schematico con le connessioni dell' <i>ATmegaXXM1</i>	24
Fig. 2.4.3.3. Schematico del transceiver CAN	25

Fig. 2.4.3.4. Schematico contenente i connettori del blocco	25
Fig. 2.4.3.5. Schematico con il relè di potenza della scheda	26
Fig. 2.4.3.6. Schematico della parte di alimentazione della scheda	27
Fig. 2.4.3.7. Schematico con i led di debug e di alimentazione	27
Fig. 2.5.1. Consumi dei principali componenti	28
Fig. 2.6.1. Schematico della connessione tra termistori e ADC delle GPIO.....	29
Fig. 2.7.1.1. Esempio di pista sulla divisione tra GND analogico e digitale [2].....	31
Fig. 2.7.1.2. Esempio di una buona connessione di un condensatore di bypass [3].....	32
Fig. 2.7.1.3. Schermata dello strumento di calcolo per la larghezza piste di <i>KiCAD</i>	32
Fig. 2.7.1.4. Piste sui lati Front, In1 e Back	33
Fig. 2.7.1.5. Piano di massa In2	33
Fig. 3.1. <i>LV_BMS</i> versione 1.1	34
Fig. 3.1.1. Foto del segnale SS della versione 1.0 visualizzato sull'oscilloscopio	35
Fig. 3.2.1. Foto del test con <i>LV_BMS</i> collegato alla batteria a bassa tensione.....	37
Fig. 3.2.2. Foto del sistema completo di batteria e <i>BMS</i> , nella scatola stampata in 3D..	38

