



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Corso di Laurea in
INGEGNERIA ELETTRONICA
E DELLE TELECOMUNICAZIONI

**Relazione Finale
SISTEMA WIRELESS DISTRIBUITO
PER IL MONITORAGGIO DI ELETTROUTENSILI
ALIMENTATI A BATTERIA**

Primo relatore: Chiar.mo Prof. Sisinni Emiliano *Emiliano Sisinni*
Secondo relatore: Chiar.mo Prof. Depari Alessandro *Alessandro Depari*

Laureando:
Molari Stefano
Matricola n. 727197

Anno Accademico 2022/2023

Sommario

<i>Introduzione.....</i>	4
1 <i>INTERNET OF THINGS</i>	7
1.1 Campi di impiego e possibili applicazioni	8
1.2 Architettura	11
1.3 Tecnologie e protocolli.....	16
1.4 LoRaWAN	19
1.5 Motivazioni e scenario applicativo.....	20
2 <i>LE BATTERIE</i>	23
2.1 Modello matematico.....	24
2.2 Tipologie e tecnologie.....	28
2.2.1 Le batterie a ioni di litio	33
2.3 Fattori di performance.....	35
2.4 Un esempio di batteria da elettroutensile	40
3 <i>MONITORAGGIO DELLA CARICA</i>	42
3.1 Schema a blocchi generale.....	42
3.2 Metodi per la misura di correnti e tensioni.....	45
3.2.1 Resistori di shunt	46
3.2.2 Sensori a effetto Hall	50
3.2.3 Misure di tensione	52
3.3 PCB di acquisizione.....	53
3.4 Il microcontrollore utilizzato e il progetto del firmware	56
3.4.1 Microcontrollori basati su Arm® 32-bit	56
3.4.2 Il microcontrollore STM32L152RE	57
3.4.3 Struttura del firmware	61
3.4.4 Implementazione del firmware	63
4 <i>VERIFICA Sperimentale.....</i>	66
4.1 Analisi preliminare della componentistica	66
4.2 Prima misura qualitativa della carica.....	68
4.3 Caratterizzazione di alcuni sensori ad effetto Hall.....	72
4.3.1 ACS758LCB-050B.....	73
4.3.2 ACS758LCB-050U.....	75
4.3.3 CZ-3A03	77
4.4 Verifica dei firmware in C	79
4.5 Carico elettronico programmabile	81
4.5.1 Il carico elettronico Keysight N3300A	81
4.5.2 Programma in Python per il comando e l'acquisizione dati	83

4.6	Caratterizzazione del sistema di acquisizione	87
4.7	Monitoraggio della scarica con carico elettronico	92
4.8	Monitoraggio della ricarica	96
4.9	Monitoraggio di un elettroutensile	98
<i>Conclusioni</i>		100
<i>Ringraziamenti</i>		102
<i>Bibliografia</i>		103
<i>Elenco delle figure</i>		105
<i>Elenco delle tabelle</i>		107

Introduzione

Questa tesi si colloca nell'ambito dell'Internet of Things (IoT), emergente neologismo utilizzato nel mondo tecnologico che definisce il collegamento a Internet di oggetti di uso comune, conferendogli un valore aggiunto utile alla vita delle persone.

Il paradigma dell'IoT trova impiego nell'industria, in agricoltura, nei trasporti, nella domotica e in molti altri campi applicativi, potenzialmente infiniti. Il limite sembra essere solo l'immaginazione.

Per non avere cavi di collegamento alla rete di distribuzione, sempre più dispositivi vengono alimentati a batteria, la maggior parte delle volte ricaricabile, il che si traduce nell'uso di sistemi e soluzioni di comunicazione wireless e nella sempre maggior necessità di ridurre i consumi per massimizzare il tempo di utilizzo. Un parco di dispositivi alimentato a batteria richiede una gestione dello stato di carica di ognuna di queste, per garantire che siano sempre disponibili.

In questa attività di tesi viene proposta una possibile soluzione al problema reale del monitoraggio wireless delle batterie presenti in questi elettroutensili. Verrà realizzato un prototipo funzionante in grado di monitorare la carica, mentre lo sviluppo dell'infrastruttura IoT è stato svolto solo concettualmente. Il lavoro è stato organizzato nel seguente modo: Acquisizione delle competenze, sviluppo della soluzione, verifica sperimentale e analisi dei risultati, come mostrato in Figura 1.



Figura 1 - Organizzazione del lavoro

Le attività iniziali sono state di raccolta di informazioni inerenti al contesto, alle tecnologie in commercio ed a tutto ciò che potesse servire alla fase di progettazione vera e propria, ampliando le conoscenze apprese negli studi triennali appena terminati. Sono state acquisite anche competenze pratiche come l'utilizzo di strumenti da laboratorio non utilizzati prima, la programmazione ad oggetti in Python, la scrittura di firmware in C per microcontrollori della famiglia ARM e la progettazione via CAD di schede elettroniche.

Dopo la fase di apprendimento è stato analizzato il problema per individuare possibili soluzioni e scegliere la più consona e realizzabile nel contesto di una tesi triennale.

In questa fase di sviluppo sono state utilizzate le competenze apprese per implementare gradualmente quanto progettato in un prototipo funzionante. È capitato in corso d'opera di apporre modifiche al progetto, per un costante miglioramento complessivo della soluzione.

Il prototipo, in ogni sua fase di realizzazione è stato testato raccogliendo dati, analizzati alla fine delle attività sperimentali per poter trarre le conclusioni di quanto fatto. L'ingegnerizzazione della soluzione proposta verrà lasciata a terzi, guidata dalle considerazioni volte a sviluppi futuri, contenute nelle conclusioni.

Nel Capitolo 1 si introdurrà il concetto di IoT, mostrandone i campi di utilizzo, l'architettura e le tecnologie e protocolli per implementarla. Verrà descritto in particolare LoRaWAN, sempre più in voga nella realizzazione di sistemi IoT volti alla trasmissione di dati a basso consumo e a lunga distanza geografica, proponendo infine la soluzione concettuale del problema oggetto di questa tesi.

Il Capitolo 2 tratterà le batterie, fornendone un modello circuitale. Verranno descritte le varie tipologie e tecnologie con cui esse sono realizzate, descrivendo in dettaglio le batterie a Ioni di Litio che spiccano tra le altre per molte ragioni che verranno descritte. Verrà fornita poi la descrizione di una batteria in commercio realizzata con tale tecnologia.

Nel Capitolo 3 si progetterà il sistema per il monitoraggio della carica utilizzando un approccio top-down nella descrizione della soluzione implementata, partendo quindi da schemi generali fino alla progettazione dei singoli blocchi. Successivamente verrà realizzato su scheda il circuito che fornirà i segnali utili ad un microcontrollore, per poter monitorare la carica della batteria. Verrà quindi scritto un firmware in C che raccolga i dati dalla scheda e li trasmetta ad un computer. Con quest'ultimo, per poter

ricevere e salvare i dati, nonché raccogliere ulteriori dati da strumentazione esterna da laboratorio, è stato scritto un applicativo in Python.

Nel Capitolo 4 verranno eseguiti dei test di carica e scarica della batteria. Essi verranno analizzati per caratterizzare il prototipo creato, e proporre migliorie da applicare in un futuro sviluppo di questa soluzione.

1 INTERNET OF THINGS

L'Internet of Things (IoT) descrive la rete di oggetti fisici che hanno sensori, software e altre tecnologie integrate allo scopo di connettere e scambiare dati con altri dispositivi e sistemi su Internet, ad esempio a database, un computer o un altro oggetto connesso [1]. Questo termine è entrato nell'uso comune da pochi anni, ma è comparso per la prima volta nel 1999 in una presentazione di Kevin Ashton, ricercatore del MIT, riguardante dei tag RFID, speciali etichette elettroniche che potevano essere applicate più o meno dappertutto e che potevano essere lette da remoto con speciali apparecchi radio.

Quasi due decenni dopo quei tag si sono trasformati in sensori in grado di leggere dall'ambiente le informazioni più diverse, come temperatura, movimento, posizione GPS, peso, composizione chimica dell'aria, umidità del suolo, e di trasmetterle ovunque nel mondo utilizzando i protocolli e le infrastrutture della rete Internet [2].

Il successo dell'IoT dipende dalla standardizzazione, che fornisce interoperabilità, compatibilità e affidabilità delle operazioni su scala globale. L'idea di collegare oggetti a Internet non è nuova, ma sta diventando popolare per molti fattori: la connessione Internet si è espansa ovunque, a basso costo e ad alta velocità attraverso servizi e tecnologie con o senza licenza; il protocollo IP è diventato lo standard globale dominante della rete, fornendo una piattaforma ben definita e implementata di software e strumenti che possono essere incorporati in un'ampia gamma di dispositivi in modo semplice ed economico; gli investimenti di ricerca e sviluppo hanno fatto sì che la legge di Moore continua a garantire una maggiore potenza di calcolo a prezzi più bassi ed un minore consumo energetico, incorporando tecnologie di elaborazione e comunicazione molto potenti in oggetti molto piccoli; i progressi nell'analisi dei dati e del cloud computing hanno permesso l'aggregazione, la correlazione e l'analisi di grandi quantità di dati, offrendo nuove opportunità per estrarre informazioni e conoscenze [3].

1.1 Campi di impiego e possibili applicazioni

Gli ambiti di applicazione dell'Internet of Things sono potenzialmente infiniti: qualunque oggetto, purché connesso alla Rete e in grado di comunicare qualcosa a qualcuno, fa parte dell'IoT.

Nell'industria, la tecnologia IoT prende il nome di "Industrial IoT" (IIoT).

Essa viene principalmente usata nelle industrie manifatturiere, per garantire visibilità sulle condizioni della fabbrica e aumentare l'efficienza produttiva. La strategia di controllo è effettuata localmente, ma si ha la possibilità di monitorare l'intero processo produttivo. I dati dei sensori installati sui macchinari vengono analizzati in tempo reale, con deadline non stringenti, e ritrasmessi ai sistemi di controllo, permettendo di migliorare i livelli di efficienza operativa e aziendale, come mostrato in Figura 2.

Le industrie di processo come quelle chimiche, siderurgiche, minerarie e metallurgiche possono monitorare real-time il processo produttivo e avviare azioni immediate.

Gli obiettivi sono molteplici: ottimizzare la produzione, riducendo costi, tempi, errori umani inserendo controlli qualità automatici per un rinnovamento continuo dei prodotti; manutenzione predittiva delle macchine; segnalazione di guasti e abbassamento del livello di qualità del prodotto; connessione con la logistica, in modo da avere sempre a disposizione materie prime; connessione con la rete di distribuzione per poterla programmare e far sì che domanda del prodotto sia sempre soddisfatta. Nell'ambiente industriale possono essere connessi a Internet sensori, attuatori, robot, veicoli a guida autonoma (AGV), macchine utensili, altiforni, ecc...

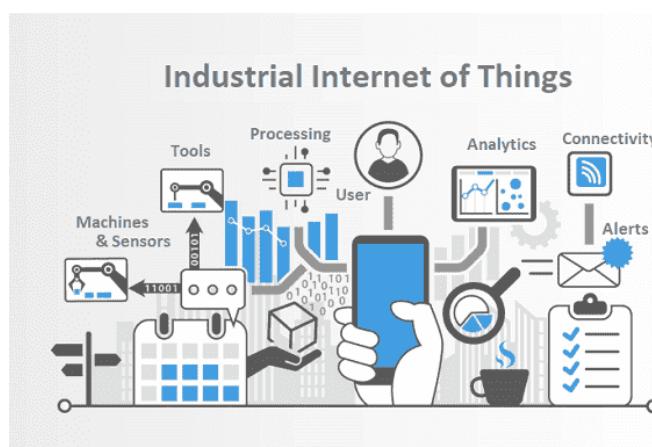


Figura 2 - Rappresentazione delle potenzialità dell'IoT.

Fonte: Digital Journal, *Industrial Internet of Things (IIoT) Market Benefit and Volume 2022 with Status and Prospect to 2028 | Dassault Systèmes, General Electric, Honeywell International Inc.,* <https://www.digitaljournal.com/pr/industrial-internet-of-things-iiot-market-benefit-and-volume-2022-with-status-and-prospect-to-2028-dassault-systemes-general-electric-honeywell-international-inc#ixzz8GUCkUcy2>

Una tecnologia emergente in questo ambiente, grazie all'infrastruttura di comunicazione fornita dall'IoT, sono i gemelli digitali, detti "digital twin", l'evoluzione dei simulatori digitali ed in quanto tali partono dal concetto di modello digitale di un'entità, fisica o virtuale, semplice o complessa e di sistema di sistemi. Il digital twin, come spiegato in [4], va oltre il concetto di simulatore perché può essere eseguito in parallelo ad un sistema reale, e soprattutto in real time, diventando così un vero e proprio riferimento digitale vivente, continuamente alimentato dagli stessi dati che il Sistema reale riceve e continuamente validato dagli output che produce il sistema stesso. Ogni deviazione è sintomo di un'anomalia del Sistema reale rispetto al suo gemello "perfetto" e quindi determina un allarme o un avvertimento da considerare per migliorarne l'affidabilità, la resilienza, le performance e la sicurezza. Ma non è tutto: il gemello digitale può essere eseguito a velocità superiore del reale, fornendo una vista sul futuro, più o meno prossimo a seconda di quanto preciso e dettagliato è stato realizzato il modello stesso.

Le simulazioni predittive aumentano la possibilità di effettuare modifiche anche minime ai processi e di valutarne gli impatti immediati, a breve e lungo termine (analisi "cosa succede se?"). Questa capacità predittiva è estremamente preziosa per molti settori applicativi, come ad esempio l'industria manifatturiera, il commercio, il marketing, i social network, la sanità.

In **agricoltura**, visto l'aumentare della popolazione e la limitatezza delle risorse disponibili, è necessario puntare a un nuovo modo di coltivare: nasce così l'agricoltura intelligente, detta "Smart Farming", il cui obiettivo principale è aiutare la produzione agricola attraverso la creazione di un sistema di supporto decisionale. Questo approccio analizza ed esamina risorse, fattori esterni come il tempo, le condizioni climatiche e altri fattori ambientali per aumentare la produzione e la qualità dei prodotti agricoli. Inoltre, gli agricoltori possono ridurre i costi di produzione e il rapporto di fallimento, ed avere una produzione agricola più produttiva e sostenibile. L'agricoltura intelligente aggiunge valore sotto forma di migliori processi decisionali o operazioni e gestione di sfruttamento più efficienti.

L'IoT permette di collegare a Internet tutti i sensori presenti nei campi, nei vivai e negli allevamenti, usati per monitorare vari parametri; comandare attuatori per irrigare il terreno, cibare gli animali, mandare segnali di allarme; guidare veicoli autonomi (droni,

trattori...) per le attività di lavorazione quali aratura, concimazione, semina, disinfezione, raccolto, come mostrato in Figura 3.

Sistemi informatici di raccolta ed elaborazione dati possono supervisionare tutte queste attività e fornire all'agricoltore soluzioni ottimali per incrementare il raccolto a parità di spazio occupato [5].



Figura 3 - Scenario d'uso dell'IoT nello Smart Farming.

Fonte: Zenadrone, Drone Technology Changing Smart Farming and Plantation?
<https://www.zenadrone.com/wp-content/uploads/2022/10/smart-farming-and-plantation-700x366.jpg>

Nelle **case** possiamo implementare soluzioni di domotica grazie a Internet, come la regolazione intelligente della temperatura degli ambienti e dell'acqua in caldaia, l'irrigazione automatica del giardino, l'apertura o la chiusura automatica di tapparelle, porte e cancelli, la misura di diversi parametri attraverso sensori di umidità, di qualità dell'aria, di incendio o di rilevazione di gas nocivi. Oppure un frigorifero che avvisa quando sta per scadere o finire un prodotto, creando la lista della spesa in automatico, la gestione elettrica dei consumi in modo da ottimizzare il risparmio, la programmazione automatica delle attività che riguardano elettrodomestici, in fasce orarie convenienti comunicate ai nostri smartphone, e molto altro ancora.

In **ambito civile** possiamo parlare di smart city, dove Internet viene usato per controllare il traffico stradale, monitorare i parametri ambientali, controllare l'illuminazione urbana, sorvegliare le strade con telecamere, gestire la manutenzione di proprietà e strutture. Sono in via di sviluppo le "smart-grid" per la gestione intelligente dell'energia elettrica prodotte da diverse fonti e utilizzatori di ogni tipo connessi alla rete elettrica.

In **medicina** l'IoT può automatizzare la raccolta di parametri vitali, aiutare a diagnosticare malattie con particolari sensori, rendere possibili le operazioni a distanza tramite robot, automatizzare semplici analisi, mandare messaggi di allarme in caso di infortuni o malori.

Nei **trasporti** si potrebbe pensare di connettere a Internet ogni veicolo, integrando sistemi di guida autonoma in aziende minerarie, di logistica, di mobilità urbana, gestendo il loro spostamento per ottimizzare le tempistiche, la riduzione dei consumi o il monitoraggio della salute del veicolo.

Ogni ambito può essere ottimizzato ulteriormente introducendo soluzioni ad hoc di intelligenza artificiale (AI), machine learning (ML) e reti neurali. L'IoT è in continua evoluzione e quindi ancora oggetto di ricerca.

1.2 Architettura

Un'infrastruttura di rete tradizionale, come descritto in [6], viene divisa in piano di infrastruttura e piano di applicazione. In questa trattazione viene descritto solo il primo, il quale è diviso in tre livelli, descritti in base alla loro funzione:

- Il **piano dati** è il percorso attraverso il quale passano i pacchetti o i frame di dati. Questi vengono identificati e inoltrati verso la giusta destinazione grazie alle tabelle di routing e di forwarding.
- Il **piano di controllo** crea e popola queste tabelle, gestendo inoltre la topologia della rete.
- Il **piano di gestione** consente all'operatore di rete di definire le politiche del piano di controllo. A tal fine, si utilizza un'interfaccia a riga di comando (CLI) o un'interfaccia di programma applicativo (API).

I componenti chiave del piano di infrastruttura sono:

- Nodi / dispositivi;
- Gateway;
- Rete;
- Wireless sensor network (WSN);
- Infrastrutture software;
- Software di automazione;
- Infrastrutture cloud ed edge computing.

I **nodi**, o dispositivi, come mostrato in Figura 4, sono costituite da sensori come dispositivi di input, attuatori come dispositivi di output e una CPU con memoria per processare e inoltrare i dati acquisiti alla rete. Essi si trovano sul campo, detto “edge”, il quale si estende su un'area più o meno grande a seconda dell'applicazione. Possiamo trattare le celle come una forma di sistemi di acquisizione.

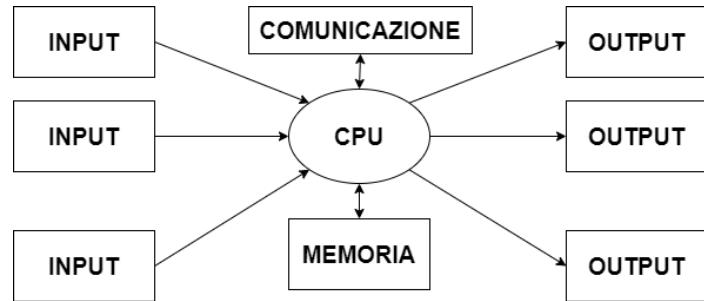


Figura 4 - Cella elementare IoT

Fonte: produzione propria

Vista l'eterogeneità di tecnologie in commercio per implementare i nodi, l'IoT utilizza uno o più **gateway** per tradurre, dal punto di vista della comunicazione, i protocolli locali del campo in IP. In Figura 5 viene illustrato lo schema di principio. Il gateway è in genere un dispositivo hardware che ospita un software applicativo che svolge compiti essenziali. Esso colma il divario di comunicazione tra dispositivi, sensori, apparecchiature, sistemi e cloud. Collegandosi poi al cloud, il gateway IoT offre l'elaborazione e l'archiviazione locale, oltre alla possibilità di controllare autonomamente i dispositivi sul campo in base ai dati immessi dai sensori. I gateway IoT consentono inoltre di aggregare, elaborare e filtrare in modo sicuro i dati per l'analisi. Contribuiscono a garantire che i dati generati da dispositivi e sistemi possano viaggiare in modo sicuro e protetto dall'edge al cloud.

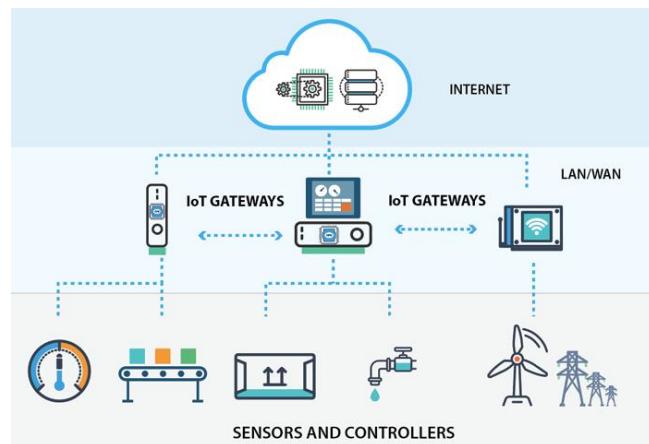


Figura 5 - Gateway nel contesto IoT.

Fonte: SPHERE BIM Digital Twin Platform, The 3 basic layers of an IoT network, <https://sphere-project.eu/wp-content/uploads/sites/10/2022/04/figure2.jpg>

La **rete** si riferisce a un gruppo di dispositivi interconnessi, come computer, che scambiano dati tra di loro. A seconda della distanza coperta, le reti sono classificate nelle seguenti tipologie base:

- **Local area network (LAN)**: i computer o dispositivi sono interconnessi in uno spazio limitato, come in casa, in ufficio o una scuola. Essi sono interconnessi da cavi ethernet o simili;
- **Personal area network (PAN)**: i dispositivi sono vicini ad un singolo utente, e questi possono anche non appartenergli. Il raggio di azione è tipicamente di alcuni metri.
- **Wireless LAN (WLAN)**: i dispositivi sono interconnessi come in una LAN ma in modo wireless.
- **Wide area network (WAN)**: diversamente dalle precedenti si estende su una grande area geografica.

Una **Wireless sensor network (WSN)**, come mostrato in Figura 6, è definita da una rete di dispositivi embedded costituiti da sensori e trasmettitori wireless per l'acquisizione dei dati e la loro trasmissione a destinazioni remote. Questi dispositivi sono preconfigurati o in grado di auto configurarsi, e acquisiscono dati come temperatura, pressione, umidità, vibrazioni e molti altri parametri, trasmessi poi al server in cloud. Solitamente queste reti non hanno una infrastruttura specifica, cioè, sono connessi ad hoc e non serve un'architettura definita per connetterli. Questi sensori wireless sono chiamati nodi e collegati a una stazione di base, di solito coincidente con il gateway, che integra i dati e li comunica attraverso la rete.

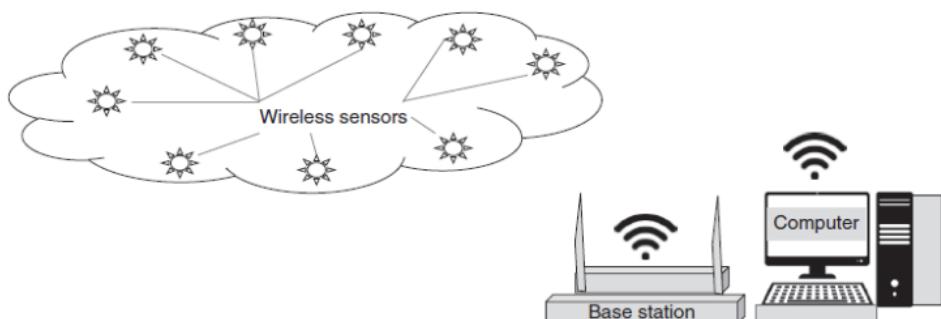


Figura 6 - Schema concettuale di una WSN.

Fonte: Arora, S., Gambheer, R., & Vohra, M. (2021). *Wireless sensor network*. in *Design of secure IoT systems: A practical approach across industries*. McGraw-Hill. <https://www-accessengineeringlibrary-com.proxy.unibs.it/content/book/9781260463095/chapter/chapter2>

Le **infrastrutture software**, dette middleware, aiutano a gestire grandi reti costituite da una grande varietà di hardware e software. Caratteristiche e funzionalità comuni di queste sono il monitoraggio di applicazioni software, bilanciamento del carico, gestione dell'archiviazione, gestione della sicurezza. Ogni macchina connessa esegue il suo software applicativo, il middleware si pone tra questo e il sistema operativo, gestendo la comunicazione e i dati.

I **software di automazione di rete e IoT** permettono di scalare la rete e l'infrastruttura IoT all'esigenza e automaticamente configurare, gestire, testare e distribuire la rete e i dispositivi IoT. Essi migliorano l'efficienza del traffico con il minimo intervento umano e rendono la rete affidabile e di qualità, permettendone la sua facile gestione.

Le **infrastrutture cloud** si riferiscono a componenti hardware e software, come server, archivi, reti, software di virtualizzazione, servizi e strumenti di gestione per supportare le richieste di calcolo di un **cloud computing**. I server sono solitamente multicore e hanno una grande capacità di archiviazione. Utilizzando il cloud computing, gli utenti e le aziende non devono gestire da soli i server fisici o eseguire applicazioni software sui propri computer. A tal proposito, il cloud consente agli utenti di accedere agli stessi file e applicazioni da quasi tutti i dispositivi, poiché l'elaborazione e l'archiviazione avvengono sui server in un data center, anziché localmente sul dispositivo dell'utente.

In informatica, si possono distinguere tre tipologie fondamentali di servizi per il Cloud computing [7], illustrate in Figura 7:

- **Infrastructure as a service (IaaS)**, modello in cui un provider cloud noleggia ad i server e l'archiviazione per varie operazioni, incluso storage, hardware, server e componenti di rete. LoRaWAN rientra
- **Platform as a service (PaaS)**, è la distribuzione di piattaforme di elaborazione e di solutioni stack come servizio. Gli elementi del PaaS permettono di sviluppare, testare, implementare e gestire le applicazioni aziendali senza i costi e le complessità associate all'acquisto, la configurazione, l'ottimizzazione e la gestione dell'hardware e del software di base. Essi possono essere impiegati per la progettazione, sviluppo di applicazioni e di servizi applicativi come la collaborazione in team, l'integrazione Web, l'integrazione del database, la sicurezza e la gestione dello stato. Ad esempio, una PaaS consente di implementare reti LoRaWAN gestite dal proprietario con estrema flessibilità nella configurazione e gestione di gateway e dispositivi.

- **Software as a service (SaaS)** è un modello dove i clienti non pagano per il possesso del software bensì per l'utilizzo dello stesso. Solitamente l'accesso al software è possibile tramite API o spesso tramite servizi web. Il SaaS è un insieme di mezzi, servizi e competenze che consente alle aziende di esternalizzare completamente alcuni aspetti del loro sistema informativo (messaggistica, sicurezza e altro) e sostituirlo con un costo di funzionamento piuttosto che con un investimento vero e proprio.



Figura 7 - Tipologie di servizi cloud.

Fonte: Combell, SaaS, PaaS, IaaS: what does it mean?, <https://www.combell.com/en/blog/saas-paas-iaas/>

Parte dell'elaborazione può essere spostata nei gateway, in modo da snellire le informazioni da processare nel cloud, migliorando i tempi di risposta e risparmiando sulla larghezza di banda; si parla così di **edge computing**. Esso offre alle aziende e ad altre organizzazioni un metodo più rapido ed efficiente per elaborare i dati utilizzando applicazioni utilizzabili da un numero anche elevato di utenti. In passato, i punti edge generavano enormi quantità di dati che spesso non venivano utilizzati. Ora che l'architettura IT può essere decentralizzata con il mobile computing e l'Internet of Things (IoT), le aziende possono ottenere informazioni pressoché in tempo reale, aggiungendo un ulteriore livello di sicurezza per i dati sensibili.

1.3 Tecnologie e protocolli

Sebbene non esistano tecnologie e protocolli dedicati all'IoT, in generale tutti i protocolli che utilizziamo per le tecnologie di rete sono effettivamente utilizzabili per le applicazioni IoT [6]. Elenchiamo ora le tecnologie e protocolli essenziali per implementare un sistema IoT, per poi darne una breve spiegazione introduttiva:

- RFID, NFC
- Bluetooth
- Zigbee
- Wi-Fi e Wi-Fi Direct
- Cellulare
- Z-Wave
- LoRaWAN

Bisogna tener presente che queste tecnologie operano in radiofrequenze diverse, distinte in bande libere e bande licenziate. Le prime sono di libero accesso, a patto di sottostare alla legislazione locale in termini di potenza emessa e di duty cycle; per quelle licenziate invece bisogna pagare o acquisire una licenza per poterci operare. In Italia, ad esempio, i servizi di comunicazione elettronica, per i quali occorre un'autorizzazione generale o una licenza individuale, sono disciplinati dal Codice delle comunicazioni elettroniche. LoRaWAN, WiFi, BT, ZWave ad esempio usano bande libere, mentre la tecnologia cellulare/mobile usa bande licenziate. Per un maggiore approfondimento si rimanda al sito del Ministero delle Imprese e del Made in Italy [8].

La tecnologia **RFID**, il cui acronimo è Radio Frequency IDentification (identificazione a radiofrequenza), è tra le più utilizzate per realizzare sistemi IoT. Queste onde vengono utilizzate per trasferire i dati e si tratta di un metodo di trasferimento non invasivo e senza contatto. Un circuito di lettura produce queste onde radio per leggere un'etichetta RFID, dotata di microchip e di un'antenna integrata. Può essere dunque definito come un'etichetta intelligente. Questi tag, attivi o passivi, possono essere utilizzati per tracciare le risorse, gestire l'inventario, tracciare qualsiasi persona, oggetto, o animale, controllare gli accessi, garantire la sicurezza nei supermercati, pagare con carte di credito/debito contactless. La comunicazione è in genere a corto raggio, ma dipende dalle tecnologie con cui i tag e i circuiti di lettura sono realizzati.

La tecnologia **NFC** (Near Field Communication) è un protocollo wireless per la comunicazione di due dispositivi su distanza molto ridotta, generalmente pari o inferiore a 4 cm. È compatibile con centinaia di milioni di carte e lettori per pagamenti

elettronici già nel mercato. Questa tecnologia viene oggi anche integrata in telefoni cellulari e orologi, per permettere il pagamento contactless.

Il **Bluetooth** è un protocollo di comunicazione wireless a corto raggio, che sfrutta un collegamento a 2,4GHz per trasmettere e ricevere segnali digitali. Esso è utilizzato principalmente per comunicazioni su reti personali (PAN), come la comunicazione tra uno smartphone e un auricolare, in dispositivi indossabili e piccole reti di sensori. È possibile realizzare una rete secondo il modello master-slave, chiamata “piconet”, con in genere un master e fino a sette slave. Il range di comunicazione può variare da 10 a 150 metri a seconda della potenza del segnale. Di recente è stata sviluppata la tecnologia bluetooth-low-energy (BLE), con un consumo energetico significativamente basso.

Zigbee è un protocollo a corto raggio e a basso consumo sviluppato come standard globale aperto per le reti personali. Esso utilizza la banda di frequenza industriale, scientifica e medica a 2,4 GHz, chiamata banda ISM, la quale non necessita nessuna licenza per operarvi. Il più grande vantaggio di questo protocollo è che è stato creato in una rete mesh auto riparante, ovvero che al verificarsi di problemi e guasti sulla rete, essi vengono risolti grazie ad algoritmi di automazione senza la necessità di intervento umano. Una rete mesh è una rete locale in cui ogni infrastruttura di nodi è collegata in modalità wireless a ogni altro nodo per il trasferimento di dati. Un altro vantaggio è l'interoperabilità: se abbiamo due dispositivi abilitati a Zigbee, ma di diversi produttori, entrambi parlano comunque lo stesso linguaggio comune e quindi possono essere facilmente integrati. Infine, la rete Zigbee è sicura, utilizzando algoritmi crittografici AES.

Il **Wi-Fi**, che sta per Wireless Fidelity, è il protocollo di comunicazione più popolare per i dispositivi IoT. Dispositivi in casa e in ufficio, come computer, stampanti, videocamere e telefoni sono connessi alla rete locale e usano Internet grazie a questo protocollo. Esso implementa nei livelli più bassi dello stack protocollare la famiglia di standard IEEE802.11, che operano a diverse radiofrequenze, fornendo varie velocità di trasferimento dati. Generalmente un bridge, detto “access point”, collega una rete cablata con una rete wireless. Se questo permette anche il collegamento a Internet, prende il nome di “router”. Quando un dispositivo vuole collegarsi a Internet, comunica con il router e stabilisce una connessione wireless. Il range massimo del Wi-Fi operante su banda a 2,4GHz è mediamente di 45m al chiuso e di 90m all'aperto. Il range viene ridotto a un terzo quando si opera su banda a 5GHz. Sebbene i segnali

siano in radiofrequenza e possano penetrare attraverso le pareti, la potenza del segnale si riduce notevolmente. Reti di sensori wireless possono essere implementate col Wi-Fi. Le più popolari sono: sensori di prossimità, rilevatori di perdite di acqua, stazioni meteorologiche, sensori di livello, sensori di rilevazione di perdite di gas, temperatura e umidità. Bisogna tener conto dell'alto consumo di questi sensori dovuto al Wi-Fi, il quale però è dovuto all'alta velocità di trasferimento dei dati. Il **Wi-Fi Direct** è utilizzato per connettere due dispositivi direttamente, in modalità detta peer-to-peer (P2P), per trasferire i dati senza la necessità di utilizzare un router o un access point.

Le applicazioni IoT che necessitano di un lungo raggio di comunicazione usano la **tecnologia cellulare**. Le tecnologie più comuni sono GSM/3G/4G/5G. Questa modalità di comunicazione permette il trasferimento di grandi quantità di dati ad alte velocità, ad esempio video in applicazioni di sorveglianza. I sensori devono avere una carta SIM e un chip ricetrasmettitore, il quale stabilisce una connessione con la più vicina cella telefonica. Questi sensori necessitano di un'energia significativa per la trasmissione dei dati; possono essere utilizzati per la domotica, le città intelligenti, la gestione del traffico, gli impianti petroliferi e di gas naturale, ecc. Le applicazioni di telemetria per il telerilevamento utilizzano sensori abilitati alla telefonia cellulare, che trasmettono i dati al server cloud per una successiva elaborazione.

Z-Wave è un protocollo wireless half-duplex a bassa larghezza di banda che opera in RF in una rete di controllo a basso costo utilizzata principalmente nelle applicazioni IoT per le case intelligenti. Esso supporta una topologia full mesh che consente a diversi dispositivi di comunicare simultaneamente tra loro. Z-Wave supporta le frequenze RF di 868,42 MHz in Europa e 908,42 MHz negli Stati Uniti. La velocità massima di trasmissione dei dati supportata è di 100 kbps con un massimo di 232 nodi collegati in una rete mesh. Questo protocollo non è destinato al trasferimento di grandi quantità di dati e quindi non è generalmente utilizzato per lo streaming o per applicazioni di dati in tempo reale critiche. La distanza supportata da Z-Wave è di circa 30 m in ambienti interni e di quasi 100 m in ambienti esterni, il che lo rende utile per le applicazioni IoT.

Per quanto riguarda LoRaWAN, vista la sua crescente importanza nelle applicazioni IoT-like, si è deciso di separarlo nel successivo paragrafo dedicato.

1.4 LoRaWAN

LoRaWAN® è un protocollo di rete LPWAN (Low Power, Wide Area Network) progettato per connettere in modalità wireless gli "oggetti" alimentati a batteria a Internet in reti regionali, nazionali o globali, e si rivolge a requisiti chiave IoT come la comunicazione bidirezionale, la sicurezza end-to-end, la mobilità e i servizi di localizzazione. LoRa, forma abbreviata di Long Range, è una tecnica di modulazione a spettro espanso, la quale offre una comunicazione RF a lungo raggio con trasmissione sicura dei dati a bassa potenza. Questa caratteristica ha reso il protocollo LoRaWAN molto popolare, perché adatto all'IoT e alle sue applicazioni. LoRa utilizza la banda radio ISM e quindi non necessita di alcuna autorizzazione per l'utilizzo di questa frequenza. I dispositivi LoRa e i protocolli aperti LoRaWAN consentono di realizzare applicazioni IoT intelligenti per la casa, smart city, smart farming, logistica e altro ancora.

I vantaggi di LoRaWAN sono molteplici:

- ha il maggior numero di implementazioni di reti pubbliche e private di tutte le LP WAN a livello globale, il che fornisce una copertura in tutto il mondo;
- penetra le barriere che bloccano la comunicazione di rete, raggiungendo i dispositivi nel sottosuolo e ad altezze elevate;
- ha un raggio d'azione molto ampio; comunica con oggetti distanti fino a 16 chilometri con una linea visiva pulita e fino a 5 chilometri in ambienti urbani densi.
- è robusto; funziona senza problemi in condizioni climatiche avverse e in ambienti di comunicazione rumorosi.
- è efficiente dal punto di vista energetico e consuma pochissima energia quando comunica con gli oggetti. I sensori possono essere installati in luoghi difficili da raggiungere e la batteria può durare anni;
- fornisce aggiornamenti del firmware via etere, evitando così di dover inviare un tecnico per aggiornare i dispositivi.
- può coprire migliaia di dispositivi da un unico gateway. Gli utenti possono adattare e scalare rapidamente le loro implementazioni sfruttando la rete esistente e i sensori disponibili per ottenere dati da un numero ancora maggiore di oggetti.

L'architettura, mostrata in Figura 8, è costituita dai dispositivi (device) i quali utilizzano il livello fisico LoRa e superiori, fino al livello applicazione per comunicare a un gateway. Quest'ultimo comunica i dati a un server di gestione. Per maggiori informazioni, riguardo LoRaWAN, è possibile consultare il sito web ufficiale [9], il quale fornisce documentazione, aggiorna sulle ultime novità, indica eventi e webinar, riguardo questa tecnologia in continua e rapida evoluzione.

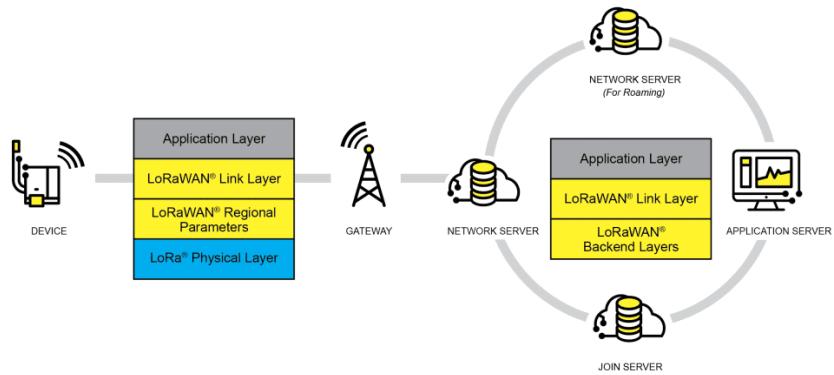


Figura 8 - Architettura di una rete LoRaWAN.

Fonte: LoRa Alliance®, LoRa Alliance Technical Stack Infographic, <https://resources.lora-alliance.org/infographic/lora-alliance-technical-stack-infographic>

1.5 Motivazioni e scenario applicativo

Vista la versatilità dell'IoT in svariate applicazioni, si è deciso di applicare questa tecnologia ad un problema reale. In aziende agricole, manifatturiere e edili viene utilizzata una grande quantità di elettroutensili, i quali sono sempre più spesso alimentati a batteria. Questi possono essere trapani, avvitatori, smerigliatrici, seghes circolari, chiodatrici, motoseghe, soffiatori, tagliasiepi e molti altri ancora. La quantità quindi di batterie impiegate in un'azienda può essere ragguardevole. Si pone dunque il problema della ricarica, la quale non è istantanea ed è richiesta in istanti di tempo diversi a seconda dell'utilizzo del singolo utensile, creando problemi di gestione delle batterie e dei caricabatterie, nonché problemi di ottimizzazione di vario tipo che verranno elencati successivamente. Per risolvere ciò è innanzitutto necessario monitorare lo stato di carica di ogni batteria, quando e quanto viene utilizzata. Il monitoraggio può essere fatto a livello locale, ma deve poi essere comunicato in qualche modo ad un'intelligenza centrale in grado di rielaborare i dati ricevuti e fornire statistiche e soluzioni agli utilizzatori di queste batterie. Il concetto di base è quindi creare una sorta di sistema distribuito per il monitoraggio di elettroutensili alimentati a batteria. Questa idea si potrebbe applicare in ogni contesto ove sono presenti batterie,

come nei veicoli elettrici a guida autonoma nell'industria, nell' agricoltura o nei trasporti urbani, in sistemi di accumulo dell'energia in una rete distribuita, in stazioni di telemetria isolate dalla rete elettrica e così via. In questa tesi è stato deciso di trattare solo gli elettrotensili per esemplificare un utilizzo.

In questa tesi si progetterà e realizzerà il singolo nodo di monitoraggio dei consumi e stima della carica, da inserire in futuro (ottimizzato e migliorato) nell'infrastruttura di rete, la quale al momento viene progettata solo idealmente. La batteria apparirà come una comune batteria ricaricabile, ma con al suo interno un sistema in grado di fare la differenza.

Viste le tecnologie a disposizione per realizzare una rete IoT, si è deciso di progettare una WSN implementata mediante l'utilizzo della tecnologia LoRaWAN, descritta nel paragrafo 1.4 per i seguenti motivi:

- Si parla di WSN perché le batterie avranno al loro interno dei sensori per monitorare la carica;
- Gli elettrotensili possono essere utilizzati in vaste aree geografiche, distanti dalla sede fisica dell'azienda;
- Il monitoraggio della carica deve consumare poca energia;
- Il sistema deve essere miniaturizzato e integrabile all'interno della scocca di una batteria;
- La comunicazione dei dati può essere sporadica (il contesto non è critico e quindi non è necessario un flusso dati real-time)
- I dati da comunicare sono pochi e di volume contenuto.

I nodi della rete sono sia le batterie che i caricabatterie, i quali comunicheranno con un gateway che si occuperà di inoltrare i dati a un server presente in azienda o nel cloud. I dati rielaborati, insieme alle scelte strategiche proposte, saranno infine comunicati tramite Internet agli utilizzatori su app per telefoni e tablet. La rappresentazione schematica del sistema di monitoraggio è mostrata in Figura 9. Le applicazioni di questa idea sono svariate: si può pensare di allungare la vita delle batterie attuando un algoritmo in grado di scegliere e comunicare all'operatore quale batteria utilizzare e quale invece ricaricare; oppure far in modo che, avendo programmate le mansioni da compiere durante la giornata, si ottimizzi l'utilizzo delle batterie per far in modo che la carica non venga mai a mancare, in modo da poter portare a termine l'obiettivo lavorativo giornaliero.

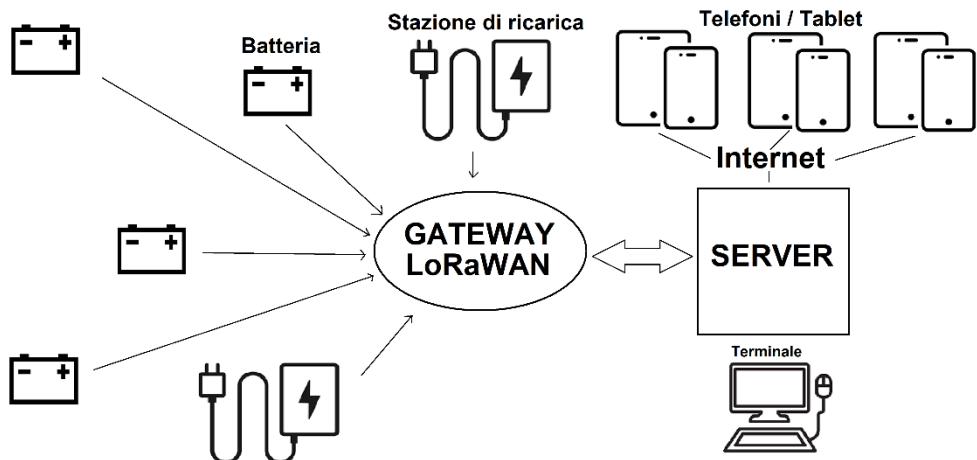


Figura 9 - Topologia del sistema di monitoraggio della carica.

Fonte: produzione propria

Potrebbe anche essere utilizzata per osservare quali elettroutensili vengano usati maggiormente, in quali fasce orarie vengano utilizzati e far in modo che, quando uno abbia la batteria scarica, mandi un segnale di allarme al sistema di gestione, il quale comunica all'operatore, su cellulare o altra piattaforma, che l'utensile che sta usando ha ancora poca autonomia.

Il monitoraggio della carica potrebbe essere dunque integrato con algoritmi di ricerca operativa, di programmazione lineare, per ottimizzare parametri diversi, quali:

- Massimizzare le mansioni conseguibili nell'arco di una giornata lavorativa;
- Minimizzare l'usura della singola batteria, facendo in modo che venga alternata con altre;
- Minimizzare il numero di batterie da ricaricare, in modo da non occupare costantemente il caricabatterie e ridurre il consumo energetico;

Inoltre, il caricatore potrebbe comunicare il completamento della ricarica agli operatori, identificare le batterie tramite tag NFC letto nell'alloggiamento di ricarica, favorendo quindi la gestione intelligente della ricarica di tutte le batterie dell'azienda. Potrebbero esserci più caricatori, dislocati in diversi luoghi e il sistema potrebbe consigliare all'utente dove andare a ricaricare la batteria scarica o dove prelevare una nuova batteria pronta per l'utilizzo. Il limite alle potenzialità di questo sistema sembra essere solo la fantasia. Prima di procedere alla realizzazione del nodo trattiamo nel seguente capitolo le batterie, elemento chiave di questa tesi.

2 LE BATTERIE

In questo capitolo vengono introdotti gli aspetti principali riguardo le batterie, facendo riferimento a [10] e [11].

Una **batteria** è un dispositivo che converte l'energia chimica contenuta nei suoi materiali attivi in energia elettrica, mediante una reazione elettrochimica di ossidoriduzione (redox). Nel caso di un sistema ricaricabile, la batteria si ricarica invertendo il processo.

Questo tipo di reazione comporta il **trasferimento di elettroni** da un materiale a un altro attraverso un circuito elettrico. In una reazione redox non elettrochimica, come l'arrugginimento o la combustione, il trasferimento di elettroni avviene direttamente e viene coinvolto solo il calore. Poiché la batteria converte l'energia chimica in energia elettrica, non è soggetta, come invece accade per i motori a combustione o a calore, alle limitazioni del ciclo di Carnot, dettate dalla seconda legge della termodinamica. Le batterie, quindi, sono in grado di avere un'alta efficienza di conversione dell'energia. Anche se si usa spesso il termine "batteria", l'unità elettrochimica di base a cui si fa riferimento è la "**cella**". Una batteria è costituita da **una o più celle**, collegate in serie o in parallelo, o in entrambi i modi, a seconda della tensione e della capacità di uscita desiderate.

La cella è costituita da tre componenti principali:

- **L'anodo**, o elettrodo negativo, l'elettrodo riducente o combustibile, che cede gli elettroni al circuito esterno e si ossida durante la fase di ricarica.
- **Il catodo**, o elettrodo positivo, l'elettrodo ossidante, che accetta gli elettroni dal circuito esterno e si riduce durante la reazione elettrochimica.
- **L'elettrolita**, il conduttore ionico che fornisce il mezzo per il trasferimento di carica, sotto forma di ioni, all'interno della cella tra l'anodo e il catodo.
- L'elettrolita è tipicamente un liquido, come l'acqua o altri solventi con sali discolti, acidi o alcali per conferire condutività ionica. Alcune batterie utilizzano elettroliti solidi o polimeri di tipo gel, che sono conduttori ionici alla temperatura di esercizio della cella.

In Figura 10 è rappresentata la cella appena descritta, dove il campo elettrico generato tra i due elettrodi fa spostare gli ioni positivi (detti cationi) verso il catodo, mentre quelli negativi (detti anioni), verso l'anodo.

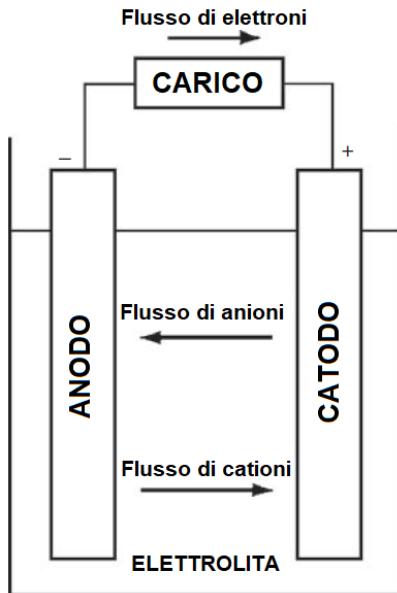


Figura 10 - Cella elementare.

Fonte: D. Linden, K. W. Beard, e T. B. Reddy, A c. di, Linden's handbook of batteries, Fifth edition. New York: McGraw-Hill, 2019, p. 1.7 (trad. propria)

2.1 Modello matematico

In questo paragrafo verrà modellizzata la batteria con un modello matematico utile all'analisi circuitale; non verranno quindi analizzate le reazioni chimiche in cui essa avvengono, il cui approfondimento viene rimandato al libro [8].

I modelli basati sull'approccio circuitale sono tra i più diffusi per applicazioni orientate all'utilizzo di batterie, non alla loro progettazione. Tra questi, i più diffusi rappresentano la batteria tramite un generatore di tensione in continua ideale in serie a uno o più circuiti RC. Per gli attuali scopi della tesi si è scelto di utilizzare un modello semplice, mostrato in Figura 11, il quale rappresenta la batteria come un generatore di tensione (dipendente dal tempo) $V_{bat}(t)$ con in serie un resistore R_{int} che indica la sua resistenza interna caratteristica. Per modelli più dettagliati si rimanda a [9].

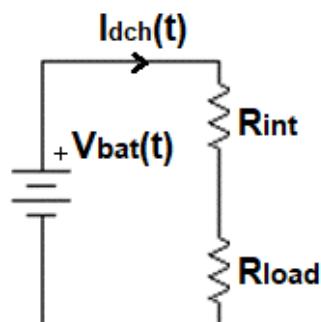


Figura 11 - Modello circuitale utilizzato.

Fonte: produzione propria

Il modello presentato verrà utilizzato per modellizzare l'equivalente circuitale della batteria quando viene scaricata. Per quanto riguarda la carica non viene formulato un modello in quanto utilizzeremo un caricabatterie già fornito dal produttore.

Nelle seguenti formule utilizzeremo la seguente simbologia e convenzioni comuni:

- t_{in} : istante di tempo iniziale della scarica;
- t_{end} : istante di tempo finale della scarica;
- $t_{in} = 0$ per convenzione.

Collegando un carico resistivo per semplicità, chiamato R_{load} , alla batteria, e applicando le leggi di Kirchhoff, si ottiene il valore della **corrente di scarica** $I_{dch}(t)$, espressa in ampère [A], che scorre al suo interno:

$$I_{dch}(t) = \frac{V_{bat}(t)}{R_{load} + R_{int}} \quad (1)$$

La corrente $I_{dch}(t)$ è anche la derivata della carica $C_{dch}(t)$ nel tempo:

$$I_{dch}(t) = \frac{d(C_{dch}(t))}{dt} \quad (2)$$

Di conseguenza la **capacità**, $C_{dch}(t)$, espressa in coulomb [C], si calcola attraverso l'integrale della corrente:

$$C_{dch}(t) = \int_{t_{in}}^{t_{end}} I_{dch}(t) dt \quad (3)$$

Molto spesso essa viene espressa in ampere-ora, [Ah], o milliampere-ora, [mAh]. Questa forma fornisce un'idea più diretta sulla durata di una batteria scaricata a corrente costante. Ad esempio, una batteria da 5Ah è in grado di erogare una corrente costante di 5A per un'ora di utilizzo. In generale la formula per calcolare la **durata in ore** di una batteria è:

$$\text{durata batteria} = \frac{\text{capacità batteria}}{\text{corrente di scarica}} \quad (4)$$

L'**energia** accumulata in una batteria, E_{dch} , espressa in watt-ora [Wh], si calcola integrando la potenza di scarica $P_{dch}(t)$ nell'intervallo di tempo tra inizio e fine scarica:

$$E_{dch} = \int_{t_{in}}^{t_{end}} P_{dch}(t) dt = \int_{t_{in}}^{t_{end}} V_{bat}(t) \cdot I_{dch}(t) dt \quad (5)$$

La **potenza media erogata** dalla batteria, \bar{P} , espressa in watt [W], si ottiene calcolando la media della potenza istantanea di scarica nell'intervallo di tempo tra inizio e fine scarica:

$$\bar{P} = \frac{1}{t_{end}-t_{in}} \int_{t_{in}}^{t_{end}} V_{bat}(t) \cdot I_{dch}(t) dt \quad (6)$$

Il valore del **rendimento amperometrico**, η_c , adimensionale, è ottenuto dal rapporto tra carica estratta durante la scarica, C_{dch} , e quella ripristinata durante la successiva ricarica, C_{ch} :

$$\eta_c = \frac{C_{dch}}{C_{ch}} \cdot 100 \quad (7)$$

Analogamente, il **rendimento energetico** η_E , adimensionale, è ottenuto dal rapporto tra l'energia scaricata durante scarica, E_{dch} , e l'energia caricata durante la ricarica, E_{ch} :

$$\eta_E = \frac{E_{dch}}{E_{ch}} \cdot 100 \quad (8)$$

Il **SOC** (State Of Charge), adimensionale, è legato alla carica attualmente presente nella batteria, e alla carica nominale dichiarata dal costruttore, $C_{nominal}$, tramite l'equazione:

$$SOC = \frac{C_{nominal} - \int_{t_{in}}^{t_{end}} I_{dch}(t) dt}{C_{nominal}} \quad (9)$$

I valori estremi del SOC, con il corrispettivo significato sono:

- SOC = 100%: batteria completamente carica;
- SOC = 0%: batteria completamente scarica.

Il **DOD** (Depth of Discharge), adimensionale, è l'inverso del SOC.

$$DOD = \frac{1}{SOC} \quad (10)$$

I valori estremi del DOD, con il corrispettivo significato sono:

- DOD= 0%: batteria completamente carica;
- DOD = 100%: batteria completamente scarica.

Introduciamo ora alcuni tassi per quantificare e caratterizzare la batteria attraverso la modalità di scarica, descritte nel successivo paragrafo.

Per descrivere la scarica o la carica a corrente costante, è il **C-Rate**, espresso con la seguente formula:

$$I_{sch} = M \cdot C_n \quad (11)$$

Dove:

- I_{sch} : corrente di scarica, espressa in ampere [A];
- C: capacità nominale della batteria, espressa in [Ah];
- n: tempo, in ore, per cui la carica della batteria è dichiarata;
- M: multiplo o frazione di C.

Ad esempio, la scarica a C/10 per una batteria dichiarata da 5Ah è di 0,5A.

La modalità di scarica a potenza costante viene caratterizzata con l'**E-rate**. Analogamente al precedente tasso, può essere utilizzato per descrivere la scarica o la carica in termini di potenza:

$$P = M \cdot E_n \quad (12)$$

Dove:

- P: potenza, espressa in [W];
- E: energia nominale della batteria, espressa in watt-ora [Wh];
- n: tempo, in ore, per cui la carica della batteria è dichiarata;
- M: multiplo o frazione di E.

2.2 Tipologie e tecnologie

Le batterie possono essere divise in due categorie: batterie primarie e secondarie. All'interno di questa classificazione, altre sono utilizzate per identificare particolari strutture o design, come ad esempio batterie di riserva o celle a combustibile.

Le **batterie primarie**, mostrate in Figura 12, sono quelle batterie che possono essere utilizzate una sola volta perché i reagenti si consumano durante il processo di scarica. Non possono essere ricaricate e devono essere smaltite quando hanno esaurito la loro energia.



Figura 12 - Esempi di batterie primarie.

Fonte: *Tutto Facile*, Tipi di pile e batterie, <https://tuttofacile.altervista.org/tipi-pile-batterie/>

Sono una comoda fonte di alimentazione per i dispositivi elettrici ed elettronici portatili, illuminazione, macchine fotografiche, dispositivi di comunicazione, apparecchi acustici, orologi, giocattoli e di molte altre applicazioni, garantendo l'indipendenza dall'alimentazione di rete. I principali vantaggi della batteria primaria sono l'economicità, la semplicità costruttiva, la facilità di utilizzo, la poca manutenzione richiesta e la possibilità di essere progettata e dimensionata per adattarsi all'applicazione. Altri vantaggi generali sono la buona durata, la densità di energia e di potenza, l'affidabilità e il costo accettabile.

Esistono diverse tecnologie di realizzazione, ciascuna con particolari caratteristiche e conseguenti possibili campi di applicazione. Vengono riassunte sinteticamente nella Tabella 1.

Tabella 1 - Tecnologie, caratteristiche e applicazioni delle batterie primarie.

Sistema	Caratteristiche	Applicazioni
Zinco/carbonio, ioni di zinco	Comuni, basso costo, disponibili in varie dimensioni.	Torce, radio portatili, strumenti.
Magnesio	Batterie ad alta capacità, lunga durata di conservazione.	Ricetrasmettitori militari e trasmettitori di emergenza per aerei.
Mercurio	Le batterie con maggiore capacità per volume, scarica piatta, lunga durata di conservazione.	Apparecchi acustici, dispositivi medici (pacemaker), fotografia, rilevatori, attrezzature militari, ma attualmente in uso limitato a causa dei rischi ambientali del mercurio.
Mercurio/cadmio	Lunga durata di conservazione, buone prestazioni a basse e alte temperature, bassa densità energetica.	Applicazioni speciali che richiedono il funzionamento in condizioni di temperatura estreme e una lunga durata, in uso limitato.
Alcalina	La batteria più diffusa per uso generale, buone prestazioni a bassa temperatura e ad alte prestazioni, basso costo.	Batteria primaria più diffusa, utilizzata in un'ampia gamma di apparecchiature portatili a batteria
Argento/zinco	La più alta capacità per peso dei tipi convenzionali, scarica piatta, buona durata di conservazione, costose.	Apparecchi acustici, fotografia, orologi elettrici, missili, applicazioni subacquee e spaziali.
Zinco/aria	Massima densità energetica, basso costo, non indipendente dalle condizioni ambientali.	Applicazioni speciali, apparecchi acustici, cercapersone, dispositivi medici, elettronica militare
Litio/catodo solubile	Alta densità energetica, lunga durata di conservazione, buone prestazioni in un ampio intervallo di temperature.	Ampia gamma di applicazioni che richiedono un'elevata densità di energia e lunga durata, ad esempio dai contatori di utenze ad applicazioni di elettronica militare.
Litio/catodo solido	Alta densità energetica, capaci di generare una potenza considerevole e prestazioni a bassa temperatura, lunga durata di conservazione, costo competitivo	Sostituisce le tradizionali celle a bottone e applicazioni con celle cilindriche, come le fotocamere digitali.
Litio/elettrolita solido	Durata di conservazione estremamente lunga, batteria a bassa potenza.	Elettronica medica.

Le **batterie secondarie**, mostrate in Figura 13, sono quelle batterie che possono essere ricaricate perché le reazioni che producono energia elettrica nel processo di scarica vengono invertite nel processo di carica. La carica della batteria viene ripristinata facendo fluire attraverso il sistema una corrente opposta a quella prodotta nella scarica.



Figura 13 - Esempi di batterie secondarie ricaricabili.

Fonti (nell'ordine): Würth Italia, Batterie e staccabatterie per camion e autocarri, <https://eshop.wuerth.it/Categorie-di-prodotti/Batteria-elettrica-camion/3114650119.cyid/3114.cgid/it/IT/EUR/n.d., 24 PCS nuovo originale 18650 30A 3400mAh INR18650 batteria ricaricabile al litio 18650 3.7 V per batterie per Laptop, AliExpress https://it.aliexpress.com/item/1005001887572360.html?gatewayAdapt=glo2ita>

Tecnobattery, Cosa sono le batterie secondarie e le tipologie, <https://www.tecnobattery.it/batterie-secondarie-al-litio-ricaricabili/>

Esse sono utilizzate in molte applicazioni, come in automotive (avviamento, illuminazione, accensione), alimentazione di emergenza e di stand by.

Le applicazioni della batteria secondaria possono dividersi in due grandi categorie:

- quelle in cui viene utilizzata come **dispositivo di accumulo dell'energia**, in genere collegata e caricata elettricamente da una fonte di energia primaria e fornire la sua energia al carico su richiesta. Ne sono un esempio i sistemi automobilistici e aeronautici, le fonti di alimentazione di emergenza e di standby (UPS), i veicoli elettrici ibridi e sistemi di accumulo dell'energia a batteria (BESS) per il livellamento del carico delle utenze elettriche (domestiche e industriali).
- Applicazioni in cui la batteria viene scaricata (**in modo simile a una batteria primaria**) e ricaricata dopo l'uso. Vengono utilizzate in questo modo, per esempio, in telefoni cellulari, computer portatili, utensili elettrici e così via, per risparmiare sui costi (in quanto possono essere ricaricati anziché sostituiti) e in applicazioni che richiedono un consumo di energia superiore alla capacità delle batterie primarie. Veicoli elettrici e ibridi rientrano in questa categoria.

Riportiamo ora nella Tabella 2, analogamente come fatto per le batterie primarie, le principali tecnologie con cui le batterie secondarie vengono realizzate, descrivendone sinteticamente le caratteristiche ed elencandone alcune possibili applicazioni.

Tabella 2 - Principali caratteristiche e applicazioni delle batterie secondarie.

Sistema	Caratteristiche	Applicazioni
Piombo/acido - automotive	Popolari e a basso costo, a bassa energia specifica, capaci di generare una potenza considerevole, prestanti a basse temperature, no manutenzione.	Automotive, macchine da golf, tosaerba, trattori, aeromobili, marina, veicoli micro-ibridi.
Piombo/acido - trazione (forza motrice)	Progettate per una scarica profonda di 6-9 ore, servizio ciclistico.	Camion industriali, movimentazione di materiali, veicoli elettrici, alimentazioni speciali per sottomarini.
Piombo/acido - stazionarie	Progettati per il servizio di standby, a lunga durata.	Alimentazione di emergenza, servizi, telefoni, UPS, livellamento del carico, accumulo e stoccaggio di energia, illuminazione di emergenza.
Piombo/acido - portatili	Sigillate, esente da manutenzione, a basso costo, con buona capacità di galleggiamento, ciclo di vita moderato.	Utensili portatili, piccoli elettrodomestici e dispositivi, apparecchiature elettroniche portatili.
Nichel/cadmio - industriali	Capaci di generare una potenza considerevole, capacità a bassa temperatura, tensione piatta, ottimo ciclo di vita.	Batterie per aerei, applicazioni industriali e di alimentazione di emergenza, apparecchiature di comunicazione.
Nichel/cadmio - portatili	Sigillate, manutenzione non richiesta, capaci di generare una potenza considerevole, performanti a basse temperature, buon ciclo di vita.	Elettronica di consumo, strumenti, cercapersone, elettrodomestici, apparecchiature fotografiche, alimentazione standby, backup di memoria.
Nichel/metallo ibride	Sigillate, manutenzione non richiesta, capacità maggiore rispetto alle Nichel/cadmio, ad alta densità e potenza.	Elettronica di consumo e altre applicazioni portatili, veicoli ibridi, veicoli elettrici.
Nichel/ferro	Struttura robusta e durevole, lunga durata, bassa energia specifica.	Movimentazione dei materiali, applicazioni stazionarie, vagoni ferroviari.
Nichel/zinco	Elevata energia specifica, lunga durata del ciclo, alta potenza.	Biciclette, scooter, elettronica di consumo, elettroutensili.

Argento/zinco	Elevata energia specifica, capaci di generare una potenza considerevole ciclo di vita corto, costo elevato.	Obiettivi di addestramento, droni, sottomarini, altri equipaggiamenti militari, veicoli di lancio e potenza spaziale.
Argento/cadmio	Elevata energia specifica, buona ritenzione di carica, ciclo di vita di durata moderata, costo elevato.	Equipaggiamento portatile con la necessità di essere leggero, ad alta capacità, satelliti.
Nichel/idrogeno	Lunga durata del ciclo di vita in condizioni di scarica superficiale, lunga vita.	Applicazioni aeroospaziali, ad esempio satelliti.
Ioni di zinco	Basso costo, buona conservazione della capacità, sigillate, non richiedono manutenzione, durata limitata del ciclo di vita e capaci di generare potenze limitate.	Applicazioni con celle cilindriche, ricaricabili in sostituzione di zinco-carbone e alcaline primarie per elettronica di consumo (sistemi a temperatura ambiente)
Ioni di Litio	Alta energia specifica e densità energetica, lunga durata del ciclo, potenza elevata.	Elettrotensili, elettronica di consumo, veicoli elettrici, accumulo di energia.

Tra le varie tecnologie, quella agli ioni di litio si contraddistingue rispetto a molte altre, per l'elevata densità energetica e potenza specifica, come mostrato dal diagramma di Ragone [11], mostrato in Figura 14. Il diagramma di Ragone mette infatti a confronto energia specifica [Wh/kg] e potenza sviluppabile [W/kg]. Si può notare come gli ioni di litio eccellano rispetto alle altre tecnologie.

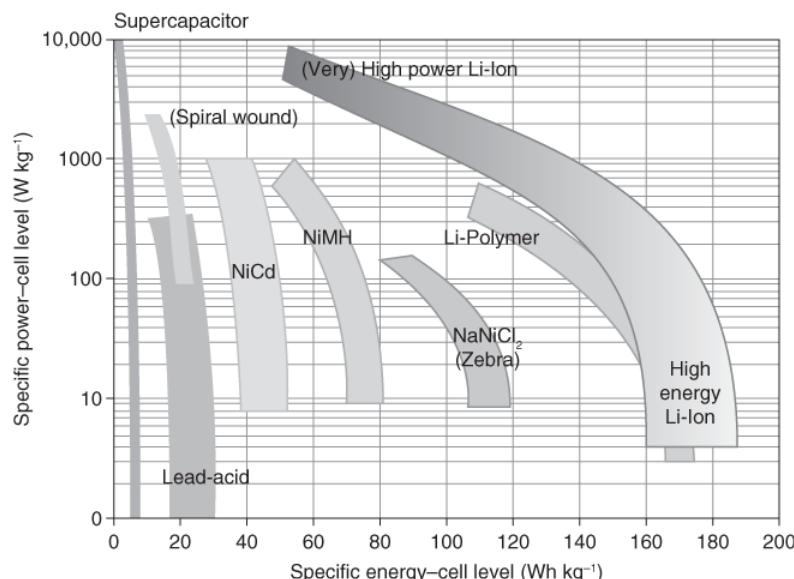


Figura 14 - Diagramma di Ragone.

Fonte: S. Petrovic, P. Kurzweil, e J. Garche, Electrochemical energy storage. New York: McGraw Hill, 2022, (Adapted from R. S. Scharner, P. Lamp, E. Hockgeiger, AABC 2010, Orlando (USA), May 17–21, 2010, courtesy BMW.), p.9

Inoltre, mettendo a confronto altri fattori (valutati da 1 a 5, dal migliore al più scarso), mostrati in Figura 15 presa da [8], la tecnologia agli ioni di litio spicca tra le altre in quasi tutti i parametri.

System	Energy density	Power density	Flat discharge profile	Low-temperature operation	Charge retention	Charge acceptance	Efficiency	Life	Mechanical Properties	Cost
Lead-acid:										
Pasted	4	4	3	3	4	3	2	3	5	1
Tubular	4	5	4	3	3	3	2	2	3	2
Planté	5	5	4	3	3	3	2	2	4	2
Sealed	4	3	3	2	3	3	2	3	5	2
Lithium-metal	1	3	3	2	1	3	3	4	3	4
Lithium-ion	1	2	3	2	1	1	1	1	2	2
Nickel-cadmium:										
Pocket	5	3	2	1	2	1	4	2	1	3
Sintered	4	1	1	1	4	1	3	2	1	3
Sealed	4	1	2	1	4	2	3	3	2	2
Nickel-iron	5	5	4	5	5	2	5	1	1	3
Nickel-metal hydride	2	1	2	2	3	1	2	2	2	3
Nickel-zinc	2	1	2	3	4	3	3	4	3	3
Silver-zinc	1	1	4	3	1	3	2	5	2	4
Silver-cadmium	2	3	5	4	1	5	1	4	3	4
Nickel-hydrogen	2	3	3	4	5	3	5	2	3	5
Silver-hydrogen	2	3	4	4	5	3	5	2	3	5
Zinc-manganese dioxide	2	4	5	3	1	4	4	5	4	2

Figura 15 - Tecnologie di batterie secondarie a confronto.

Fonte: D. Linden, K. W. Beard, e T. B. Reddy, A c. di, Linden's handbook of batteries, Fifth edition. New York: McGraw-Hill, 2019., p. 15.12

Ecco perché le batterie agli ioni di litio sono emerse nell'ultima decade, detenendo il 75% del mercato delle piccole batterie per i consumatori [8]. In questa tesi andremo a utilizzare questa tecnologia, ideale per gli elettroutensili. Nel sottoparagrafo 2.2.1 le descriveremo in dettaglio.

2.2.1 Le batterie a ioni di litio

Questa tecnologia è la più diffusa, basti pensare che la troviamo nei cellulari, nei laptop, cuffie e casse bluetooth, nelle batterie per utensili portatili da cantiere, industria e giardinaggio. Queste celle forniscono un'alta densità di energia e un lungo ciclo di vita. Elenchiamo nella Tabella 3, vantaggi e svantaggi di questa tecnologia.

Tabella 3 - Vantaggi e svantaggi delle batterie a ioni di litio.

Vantaggi	Svantaggi
Sigillate, non richiedono manutenzione.	Si degradano ad alte temperature.
Ciclo di vita lungo.	Necessitano di circuiti di protezione.
Funzionamento in ampio intervallo di temperatura.	Perdono capacità e tensione per fuga termica in caso di sovraccarico.
Lunga durata di conservazione della carica.	Possibilità di sfialo e fuga termica in caso di schiacciamento.

Basso tasso di autoscarica.	Possono rompersi se caricate rapidamente a basse temperature.
Scarica ad alta velocità e potenza.	
Alta efficienza coulombiana ed energetica.	
Nessun effetto di memoria.	
Diversi design, ne favoriscono l'integrazione in un progetto.	

Secondo la guida “Procedura di prova RSE-ENEA per batterie litio-ioni” [12], le prestazioni delle celle litio-ioni dipendono, oltre che dalla tipologia di materiali elettrodici utilizzati, anche dai processi realizzativi della cella. La stessa tipologia di cella può essere realizzata per applicazioni in potenza oppure in energia. Per tale ragione in commercio è possibile trovare una grande varietà di celle al litio i cui parametri prestazionali tipici sono indicati nella Tabella 4.

Tabella 4 - Parametri prestazionali tipici per le celle litio-ioni.

Parametro	Valore Tipico	Commento
Capacità delle celle [Ah]	0,1 ÷ 10000	Le celle in commercio coprono un ampio range di capacità, ma le celle maggiormente diffuse hanno una capacità tipica dell'ordine dei 10 Ah.
Potenza specifica [W/kg]	200 ÷ 3000	Questi parametri sono influenzati dai materiali elettrodici oltre che dalla realizzazione della cella, che può essere in potenza o in energia
Energia specifica [Wh/kg]	40 ÷ 180	
Rendimento energetico [%]	80 ÷ 95	
Rendimento amperometrico [%]	100	
Regime di scarica tipico (C rate)	C/3 ÷ 2C	Le celle possono essere realizzate per applicazioni in potenza o in energia, e presentano valori di corrente differenti.
Massima corrente in scarica e in carica (C rate)	1C ÷ 100C in scarica C/2 ÷ 10C in carica	
Autoscarica mensile [%]	<1	
Vita attesa DOD 80% [cicli]	1500÷5000	Dipende dalla tipologia di cella
Range di temperatura di lavoro	-30 ÷ 60°C in scarica 0 ÷ 60°C in carica	Le celle con elettrodi in grafite non permettono la carica a temperatura inferiori ai 0°C, mentre l'anodo in titanato di litio garantisce un intervallo di temperatura in carica più ampio (fino a -30°C).

Sistemi necessari	Sistema di bilanciamento BMS	Il sistema di condizionamento della temperatura è opzionale per queste celle, anche se la presenza di tale dispositivo risulta molto utile.
-------------------	------------------------------	---

Le batterie a ioni di litio vengono realizzate componendo in serie e in parallelo diverse celle singole, a seconda delle prestazioni che si vogliono ottenere e alle dimensioni cui la batteria deve avere. Vengono inoltre dotate di circuiti di protezione vista la loro pericolosità.

2.3 Fattori di performance

Le caratteristiche delle batterie, quali capacità, durata della vita, rendimento, energia, potenza, tensione, corrente ecc. dipendono da come essa viene utilizzata, ovvero dai metodi di scarica e ricarica, dalla temperatura, dal tempo di inutilizzo, dal numero di cicli di ricarica e molto altri fattori, come riportato nel libro [8].

Esistono tre modi di scarica:

- **Resistenza costante:** la resistenza del carico rimane costante durante la scarica (la corrente diminuisce proporzionalmente alla diminuzione della tensione della batteria);
- **Corrente costante:** la corrente rimane costante durante la scarica
- **Potenza costante:** la corrente aumenta tanto quanto la tensione diminuisce, scaricando così la batteria a potenza costante.

Noi analizzeremo la modalità di scarica a corrente costante. Viene mostrato nel grafico, presente in Figura 16, l'andamento tipico della tensione della batteria, definendo una tensione di interruzione V_{cod} (cut-off-discharge), alla quale una batteria è considerata

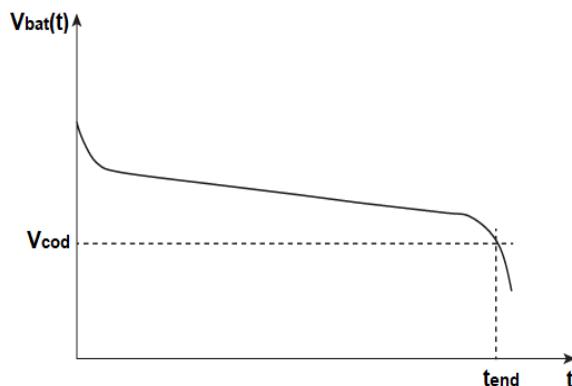


Figura 16 - Andamento tipico, della tensione nel tempo, di una batteria scaricata a tensione costante, per qualunque tecnologia realizzativa.

Fonte: S. Petrovic, P. Kurzweil, e J. Garche, *Electrochemical energy storage*. New York: McGraw Hill, 2022, p. 3 (trad. propria)

completamente scarica, oltre la quale un'ulteriore scarica potrebbe causare danni. Il corrispettivo istante di tempo è chiamato t_{end} .

La **capacità nominale** indicata dal produttore si basa su dati empirici. La capacità nominale raramente ha lo stesso valore della capacità effettiva misurata di una cella perché dipende fortemente dalla temperatura e dalla corrente di scarica. Come per qualsiasi altra reazione chimica, l'aumento della temperatura comporta un aumento della capacità a causa della maggiore velocità di reazione.

La dipendenza della tensione $V_{bat}(t)$ durante la scarica è descritta dalla seguente equazione:

$$V_{bat}(t) = V_0 - I \cdot R_\Omega - \eta \quad (13)$$

Dove:

- V_0 è la tensione termodinamica (senza perdita) della cella;
- $R\Omega$ la resistenza dovuta al lento trasporto degli ioni e alla resistenza elettrica;
- η descrive la perdita della tensione dovuta alle reazioni lente di trasferimento della carica tra elettrodo e elettrolita.

Come mostrato nella Figura 17, con l'aumento della temperatura, la resistenza ohmica e la polarizzazione sugli elettrodi si riducono (curva superiore della figura). Quindi la tensione di cut-off è più alta o viene raggiunta più tardi, t_{end1} .

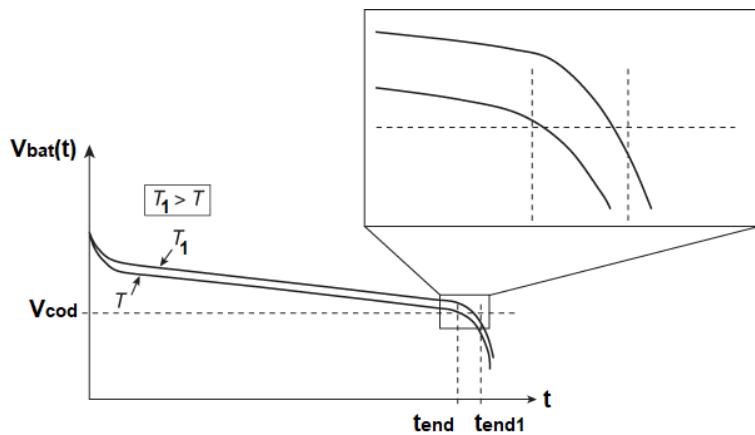


Figura 17 - Effetto della temperatura sulla tensione a parità di corrente di scarica.

Fonte: S. Petrovic, P. Kurzweil, e J. Garche, *Electrochemical energy storage*. New York: McGraw Hill, 2022, p. 3 (trad. propria)

Con l'aumentare della corrente di scarica I , la tensione V_{bat} diminuisce a causa delle maggiori perdite resistive e della maggiore polarizzazione dell'elettrodo. Questo fenomeno viene mostrato nel grafico in Figura 18, dove si nota l'abbassamento della curva di tensione corrispondente a una maggiore corrente di scarica I_1 .

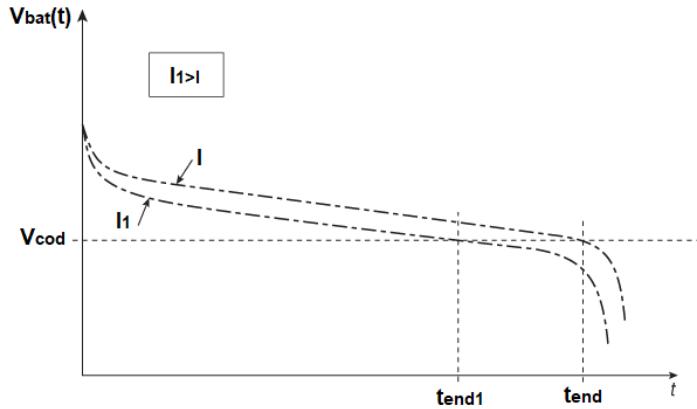


Figura 18 - Effetto dell'intensità della corrente di scarica sulla tensione della batteria.

Fonte: S. Petrovic, P. Kurzweil, e J. Garche, *Electrochemical energy storage*. New York: McGraw Hill, 2022, p. 5 (trad. propria)

L'**effetto della corrente di scarica sulla capacità** è dato dall'equazione di Peukert [9]. Sulla base di una capacità nota C , a una certa corrente di scarica I , è possibile calcolare la capacità C_1 alla corrente di scarica I_1 attraverso la seguente equazione:

$$C_1 = C \left(\frac{I}{I_1} \right)^{p-1} \quad (14)$$

La capacità calcolata, C_1 , dipende principalmente dal coefficiente di Peukert (p), che è legato alla resistenza interna della cella. La resistenza interna non solo varia a seconda del tipo di batteria, ma si basa anche sulle caratteristiche di progettazione per la stessa chimica della batteria. I valori riportati nella Tabella 5 sono valori approssimativi, che dipendono inoltre dalla temperatura e dall'età della batteria.

Tabella 5 - Coefficiente di Peukert (p) per alcuni tipi di batteria a temperatura ambiente.

Batteria	Coefficiente di Peukert
Piombo-acido annegata	1.2–1.4
Nichel-cadmio	1.10–1.20
Ioni di litio	1.05–1.1
Batteria ideale	1.0

La capacità della batteria diminuisce con l'aumento della corrente di scarica e dipende dal coefficiente di Peukert, come mostrato in Figura 19.

L'autoscarica si riferisce alla tendenza di ogni batteria a perdere parte della sua capacità nel periodo di riposo e in assenza di corrente esterna. Questa perdita è causata principalmente dalle instabilità termodinamiche delle masse attive e dei componenti della cella. Il tasso di autoscarica è solitamente espresso come percentuale di perdita di capacità al mese o all'anno. Alcuni tassi di autoscarica sono riportati nella seguente Tabella 6:

Tabella 6 - Tassi di autoscarica di alcune tipologie di batterie.

Tipologia di batteria	Tasso di auto-scarica
Ioni di litio	<2% per mese
Nichel-Cadmio	~15–20% per mese
Piombo acido	~2–5% per mese all'inizio e fino a 15–25% al mese per vecchie batterie
Li-Mn ₂ O ₄ (primarie)	~1–2% per anno

La **vita** di una batteria è influenzata dalla capacità, dall'autoscarica, dalla resistività interna e occasionalmente altro, ma di solito la fine della vita utile viene raggiunta quando la capacità scende a meno dell'80% della capacità nominale. A volte, come indicatore di fine vita si utilizza anche l'aumento della resistenza interna di un fattore compreso tra 1,3 e 2,0.

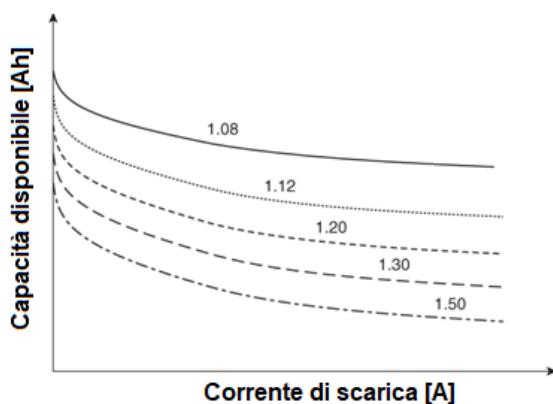


Figura 19 - Capacità in funzione della corrente di scarica a diversi valori di p .

Fonte: S. Petrovic, P. Kurzweil, e J. Garche, *Electrochemical energy storage*. New York: McGraw Hill, 2022, p. 6 (trad. propria)

Esistono tre fasi del processo di invecchiamento, analoghe a quelle considerate per i dispositivi elettronici: **vita iniziale**, **vita utile** e **usura**.

I guasti all'inizio della vita utile sono causati da problemi di produzione, come i cortocircuiti tra i poli o le interruzioni elettriche tra le celle di una batteria, mentre le fasi di vita utile e di usura possono essere notevolmente influenzate dall'applicazione e

dalle condizioni di utilizzo, come la temperatura, le vibrazioni e il profilo di utilizzo elettrico. La durata di vita o ciclo di vita, espressa in **numero di cicli**, è una delle proprietà più importanti di una batteria e viene utilizzata per definire la durata di una batteria nelle applicazioni in cui è importante un numero elevato di cicli di carica e scarica. Le cause principali dell'invecchiamento dei cicli sono la deformazione meccanica, i cambiamenti nella microstruttura dei materiali attivi e la corrosione del collettore di corrente. Maggiore è la profondità della scarica, maggiore è la deformazione meccanica e quindi minore è la durata del ciclo. Il legame tra la profondità di scarica (DOD) e la durata del ciclo non è lineare, ma esponenziale a causa dei piccoli cambiamenti nella struttura della massa attiva a bassa scarica, che mantiene in gran parte la struttura originale. Oltre al DOD, la durata del ciclo è influenzata dalle correnti di carica/scarica e dalla temperatura. Ciò è particolarmente vero per le batterie in cui la reazione di scarica/carica è una reazione di precipitazione in soluzione, come nelle batterie al piombo. Per maggiori dettagli e altri fattori di progetto che influenzano le performance di una batteria si rimanda al libro di testo [11], vengono riassunti nella seguente Figura 20 i fattori che influenzano la vita di una batteria.

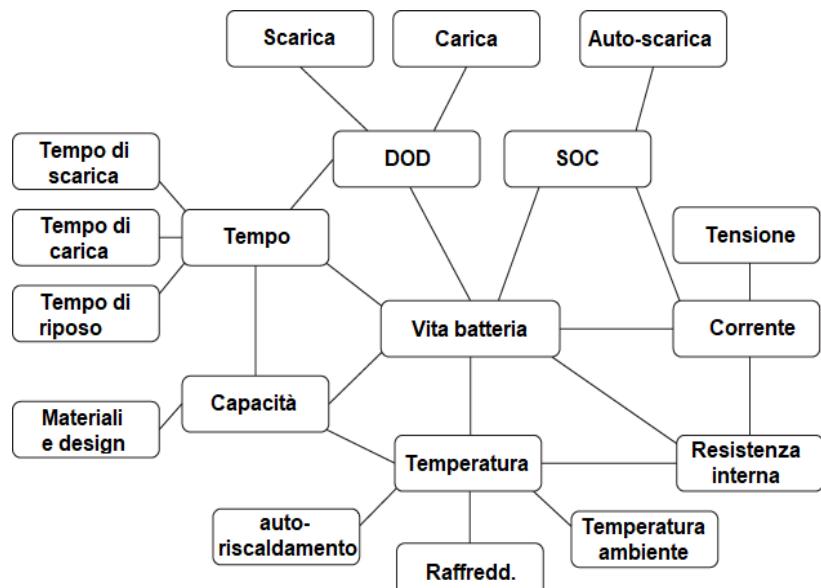


Figura 20 - Effetti di influenza sulla durata della vita di una batteria.

Fonte: S. Petrovic, P. Kurzweil, e J. Garche, *Electrochemical energy storage*. New York: McGraw Hill, 2022,
Most important lifetime stress factors for Li-ion batteries and their interactions. (Reproduced from M. A. Danzer, V. Liebau, F. Maglia, in *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, ed. by B. Scrosati, J. Garche, W. Tillmetz, Woodhead Publishing-Elsevier, Amsterdam, 2015, pp. 388.), p. 14 (trad. propria)

2.4 Un esempio di batteria da elettroutensile

Per svolgere la tesi c'era in dotazione un caricabatterie e una batteria agli ioni di litio di marca Makita; comunque, l'attività sperimentale descritta nei capitoli successivi può essere svolta su qualsiasi altra marca o tipologia di batteria. Questa batteria è ampiamente utilizzata negli elettroutensili da cantiere, da officina e giardinaggio, mostrati in Figura 21, motivo per cui essa è stata scelta per dimostrare l'applicabilità della soluzione proposta a una batteria di uso quotidiano facilmente reperibile.



Figura 21 - Alcuni elettroutensili Makita alimentati a batteria.

Fonte: Makita, 18V LXT® Lithium-Ion Cordless 7-Pc. Combo Kit (3.0Ah),
<https://www.makitatools.com/products/details/XT704>

Dal sito del produttore [13] vengono riportate le seguenti informazioni, come mostrato in Figura 22:

Batteria LXT® BL1850B 5,0 Ah

197280-8

LXT® • 18 V • Li-ion • 5,0 Ah
BL1850B

Batteria per utensili Li-ion LXT® da 18V.

Batteria agli ioni di litio con capacità di 5,0 Ah e indicatore del livello di carica. Batteria potente per uso generale per utensili Makita LXT® da 18V. Ideale per utensili ad alto consumo energetico. Tempo di ricarica circa 45 minuti con caricabatterie rapido.

SPECIFICHE TECNICHE		VANTAGGI PER L'UTILIZZATORE	
Piattaforma LXT	✓	Indicatore stato batteria	
Tensione nominale della batteria	18 V		
Capacità batteria	5,0 Ah		
Capacità energetica	90 Wh		
Tipo batteria (Ni-Cd / Ni-MH / Li-ion)	Li-ion		
Dimensioni prodotto	113 x 75 x 62 mm		
Peso netto	0,63 kg		

Figura 22 - Specifiche tecniche della batteria Makita BL1850B.

Fonte: Makita, Datasheet Batteria LXT® BL1850B 5,0 Ah,
https://www.makita.it/data/sr/productinfo/generated/197280-8_3.pdf

Il caricabatterie, mostrato in Figura 24, presenta due alloggiamenti per poter caricare due batterie simultaneamente, ha un indicatore led per lo stato del processo di ricarica



Figura 23 - Caricabatterie Makita DC18RD.

Fonte: Leroy Merlin, Caricatore MAKITA in litio (li-ion) 18V, 9Ah, <https://www.leroymerlin.it/prodotti/utensileria/elettroutensili/batterie-e-caricabatterie-per-elettroutensili/set-caricabatteria/caricatore-makita-in-litio-li-ion-18v-9ah-82195605.html>

e si collega all'alimentazione di rete 230V. Presenta anche un condotto di ventilazione per tenere costante la temperatura della batteria durante la ricarica. Le istruzioni si trovano sul sito del produttore.

Vengono riportate in Figura 24 le specifiche tecniche dichiarate dal produttore, prese dal sito ufficiale [14].

Nel Capitolo 4 verranno analizzati sperimentalmente, osservando il comportamento del caricabatterie durante la carica e il comportamento della batteria durante la scarica.

Caricabatterie doppio LXT®

196933-6

LXT® • 14,4 - 18V • Li-ion •
DC18RD

Caricabatterie per batterie LXT® da 14,4V e 18V.

Un caricabatterie rapido per due batterie LXT® a slitta da 14,4V e 18V. Dotato di una ventola di raffreddamento che raffredda la batteria per consentire una ricarica più rapida. Ricarica ottimizzata in termini di tensione, corrente e temperatura. Tempo di ricarica 15 – 55 minuti, a seconda della capacità della batteria.

SPECIFICHE TECNICHE

Tensione nominale della batteria	14,4 / 18 V
Piattaforma LXT	✓
Tempo di ricarica 1,3Ah	15 min
Tempo di carica 1,5Ah	15 min
Tempo di ricarica 2,0Ah	24 min
Tempo di ricarica 3,0Ah	22 min
Tempo di ricarica 4,0Ah	36 min
Tempo di ricarica 5,0Ah	45 min
Tempo di ricarica 6,0Ah	55 min
Cavo di alimentazione	2,0 m
Dimensioni prodotto	205 x 340 x 100 mm
Peso netto	2,1 kg

Figura 24 - Specifiche tecniche del caricabatterie Makita DC18RD.

Fonte: Makita, Datasheet Caricabatterie doppio LXT, https://www.makita.it/data/sr/productinfo/generated/196933-6_3.pdf

3 MONITORAGGIO DELLA CARICA

In questo capitolo verrà illustrata la progettazione del sistema per il monitoraggio della carica, partendo da uno schema generale e proponendo poi una possibile implementazione parziale. Le proposte di miglioramento future e di ingegnerizzazione ottimale del sistema verranno esplicate nelle conclusioni.

3.1 Schema a blocchi generale

Il sistema, mostrato in Figura 25, sarà collocato internamente alla batteria dell'elettroutensile, la quale esternamente sembrerà una comune batteria.

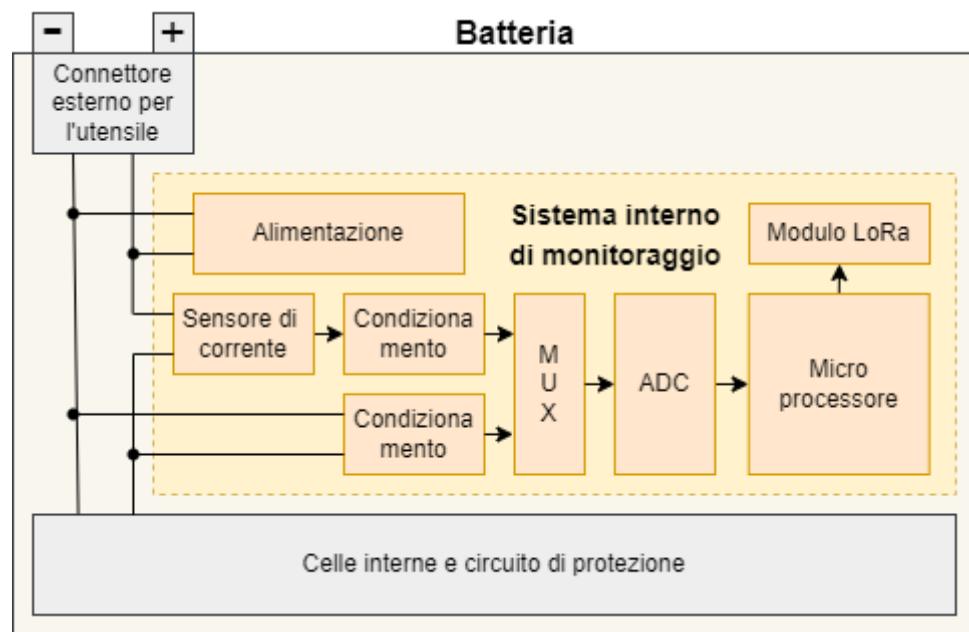


Figura 25 - Schema interno di una batteria con sistema di monitoraggio della carica integrato.

Fonte: produzione propria

All'interno della scocca meccanica della batteria sono quindi presenti le singole celle, collegate in serie o in parallelo a seconda delle caratteristiche di performance che si vogliono ottenere. Queste sono controllate da un circuito di protezione, collegato a un connettore per permettere il collegamento elettrico della batteria all'elettroutensile. Le celle, il circuito di protezione e il connettore in questa tesi verranno già assunti come progettati e realizzati da un venditore di batterie. Si andrà dunque a progettare un sistema collegato tra il circuito di protezione e il connettore, per permettere il monitoraggio dei consumi e il calcolo della stima di carica residua, utilizzando le formule del paragrafo 2.1. Questo sistema deve essere piccolo, a basso consumo elettrico (essendo alimentato direttamente dalla batteria), e dotato di modulo di

comunicazione LoRa per comunicare i dati raccolti e rielaborati a un gateway LoRaWAN esterno.

Il sistema è concettualmente composto da:

- un **sensore di corrente**, per la misurazione della corrente erogata dal pacco di celle al carico;
- un **blocco di condizionamento** in cascata al sensore di corrente in modo da adattare il segnale al range di tensione leggibile dall'ADC;
- un **blocco di condizionamento** per adattare la tensione della batteria al range di tensione leggibile dall'ADC;
- un **MUX analogico**, ovvero un multiplexer per selezionare il segnale da leggere;
- un **ADC**, ovvero un convertitore analogico-digitale, che converte il segnale di tensione al suo ingresso in un valore numerico manipolabile dal microprocessore;
- un **microprocessore**, per la lettura dei valori di tensione generati dai sensori e condizionati, per la memorizzazione, elaborazione e invio dei dati raccolti al modulo di comunicazione LoRa;
- un **modulo LoRa** che riceve i dati dal microcontrollore e li comunica via wireless ad un gateway dell'infrastruttura di rete esterna;
- un **blocco di alimentazione** che preleva la potenza necessaria dalle celle interne, per permettere il funzionamento del sistema di monitoraggio.

Come vedremo, il sistema verrà realizzato da un microcontrollore, il quale integra al suo interno il microprocessore, il MUX analogico e l'ADC; verrà inoltre sostituito il modulo LoRa con un computer in grado di ricevere e loggare i dati di misura per permetterne l'analisi sperimentale. In questa tesi il sistema di monitoraggio sarà realizzato esternamente alla batteria, in un prototipo funzionante e non ottimizzato, il cui scopo è quello di "proof of concept", da ingegnerizzare in altra sede.

L'obiettivo dell'attività nel suo complesso è il sistema con il modulo radio, ma per il test del sistema di acquisizione si è lavorato sul setup "semplificato" mostrato in Figura 26.

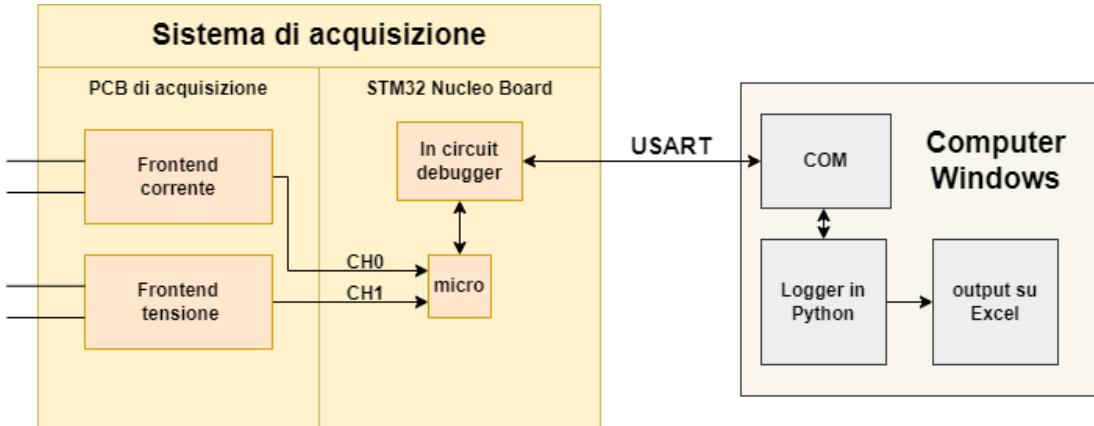


Figura 26 - Schema concettuale della soluzione implementata.

Fonte: produzione propria

Dallo schema possiamo notare come il sistema di acquisizione sia formato da una PCB sulla quale sono presenti i circuiti per la misura di tensione e di corrente: i segnali di tensione così prodotti, vengono letti da due canali analogici del microcontrollore, presente sulla Nucleo Board (verrà descritta nel paragrafo 3.4.2, insieme al firmware scritto per utilizzarla). La scheda Nucleo, fornita di un in-circuit-debugger, comunica i dati via seriale a un computer con sistema operativo Windows, i quali verranno letti e loggati da un applicativo software scritto in Python, realizzato e descritto nel paragrafo 4.5.2, che verranno poi successivamente salvati su un file Excel.

È stato scelto di non collegare subito il modulo LoRa per poter analizzare i dati in output dal sistema di acquisizione, per poter verificare il suo corretto funzionamento. In un secondo momento, basterà sostituire al computer un modulo LoRa interfacciabile a una infrastruttura LoRaWAN esistente. Questo perché la scelta del modulo di comunicazione non influisce sulle caratteristiche di misurazione, è facilmente integrabile nel sistema, e si può scegliere tra una varia gamma di modelli di produttori diversi.

Come vedremo nel capitolo 4 verranno collegati altri strumenti di misura da laboratorio, utili per testare e validare il sistema progettato, che verranno gestiti a loro volta dal software in Python

3.2 Metodi per la misura di correnti e tensioni

Dal modello matematico formulato nel paragrafo 2.1, per conoscere lo stato di carica residua della batteria, dobbiamo misurarne corrente di scarica e tensione, per far in modo che non venga scaricata troppo sotto la tensione di cut-off.

Queste due sono grandezze fisiche di interesse comune nei circuiti elettrici, le quali possono avere ordini di grandezza sia bassi che elevati, spesso non compatibili con i range di tensione del sistema di acquisizione. Ecco perché bisogna inserire un sensore, un oggetto in grado di trasformare una corrente in una tensione, seguito da un blocco di condizionamento per filtrare e adattare ulteriormente la sua tensione in uscita allo stadio successivo. Questo per quanto riguarda la misurazione di corrente, mentre per l'acquisizione della tensione sensore e condizionamento sono praticamente lo stesso circuito, sono stati rappresentati separati nello schema per evidenziarne la struttura concettuale.

L'esecuzione di questo tipo di misure viene solitamente effettuato con voltmetri e amperometri. In questa tesi siamo interessati al monitoraggio di grandezze tempo varianti.

Un **voltmetro** misura la tensione applicandolo in parallelo ai nodi del circuito di interesse. Per essere ideale non deve influenzare la misura, quindi idealmente non deve assorbire corrente. Nella realtà non è realizzabile una resistenza infinita, dunque viene realizzato con un valore di resistenza elevata, attorno ai megaohm.

Un **amperometro** invece misura la corrente, applicandolo in serie al ramo del circuito dove la si vuole misurare. Idealmente deve avere una resistenza nulla, in modo da non presentare cadute di tensioni. Ciò non è realizzabile nella realtà; vengono dunque proposti amperometri con bassa resistenza interna di pochi milliohm.

In questo progetto bisogna replicare il comportamento di questi due oggetti, da integrare in una scheda di piccole dimensioni. Elenchiamo ora le possibili implementazioni di sensori di corrente e di tensione.

3.2.1 Resistori di shunt

Il più semplice metodo di misura di corrente, concettualmente, è il **resistore di shunt**, che prevede di inserire un resistore (detto shunt) in serie nel ramo dove si vuole misurare la corrente.

La corrente è data dalla Legge di Ohm, [15]:

$$I(t) = \frac{V(t)}{R} \quad [A] \quad (15)$$

Si va dunque a misurare la differenza di potenziale ai capi dello shunt e la si divide per il valore noto di resistenza.

Questo metodo è semplice ed economico, ma bisogna comunque avere accortezze non banali per quanto riguarda la sua progettazione.

Il resistore di shunt è un resistore di precisione, con **basso valore ohmico**, in genere dell'ordine di milliohm o frazioni di milliohm, inserito nel percorso della corrente. Ai suoi capi sviluppa una tensione proporzionale alla corrente che lo attraversa, di pochi millivolt visto il basso valore di resistenza.

Questa dovrà essere dunque amplificata da un amplificatore differenziale, il quale genera un segnale più robusto in grado di essere letto correttamente da uno stadio di conversione ADC per poi essere trattato numericamente. In Figura 27 viene rappresentato uno schema concettuale.

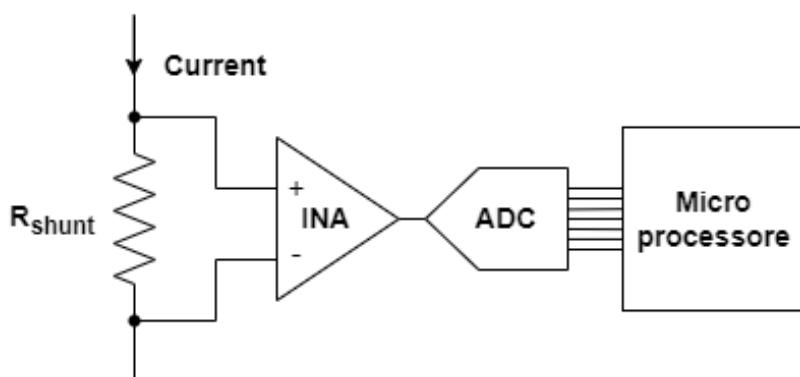


Figura 27 - Schema concettuale della misura di corrente col metodo del resistore di shunt.

Fonte: Produzione propria

La scelta dello shunt risulta quindi critica: un valore di resistenza troppo elevata può ridurre la tensione disponibile per il carico e sprecare potenza, la quale dovrà poi essere dissipata in calore per effetto Joule. I resistori reali sono influenzati dalla

temperatura, e quindi un surriscaldamento di questi può modificarne le caratteristiche elettriche compromettendo la qualità della misurazione. Al contrario un resistore con resistenza troppo bassa potrebbe rendere difficoltosa la lettura del valore di tensione, che potrebbe essere di valore talmente basso da confondersi con il rumore presente. I resistori devono quindi avere una resistenza minima che crei un compromesso riguardo quanto appena detto. Inoltre, devono avere un **basso coefficiente termico**, che porta a un'elevata precisione di misura con una limitata dipendenza dalla temperatura.

I resistori di shunt devono inoltre funzionare su un ampio valore di correnti: quando la corrente è bassa l'ordine di grandezza della differenza di potenziale ai suoi capi è paragonabile a quello della tensione sviluppata dalla f.e.m. termica, la quale viene sommata alterando la misura (fenomeno che invece per alti valori di corrente può essere trascurato).

In commercio esistono modelli di shunt a due o quattro terminali, principalmente SMD che occupano pochissimo spazio sulla scheda, ma non potendo dissipare grandi quantità di calore dovrebbero essere posti ben distanti da componenti sensibili a questo. Sul sito Digikey si trova una utile guida per la scelta e il dimensionamento di queste [15].

Vista la bassa resistenza che caratterizza gli shunt, bisogna considerare il fatto che le piste di collegamento di questi sono esse stesse dei resistori, di resistenza quindi non più trascurabile come mostrato in Figura 28.

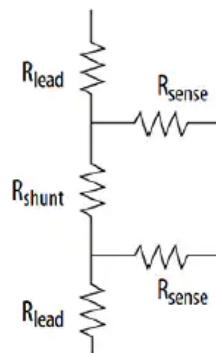


Figura 28 - Resistenze da considerare per il dimensionamento di uno shunt.

Fonte: Steve Leibson, Nozioni di base sulla misurazione della corrente: Parte 1 – Resistori di rilevamento corrente, (Immagine per gentile concessione di Bourns), p. 4

Per ovviare a questo problema si realizza una **connessione Kelvin** realizzando tracce di rilevamento separate verso lo shunt a due terminali. Queste tracce, serie al resistore, sono di dimensione nettamente maggiore rispetto a quelle di rilevamento della

tensione perché lette attraverso un'alta impedenza, aumentando dunque l'accuratezza di misura. Una connessione Kelvin è mostrata in Figura 29.

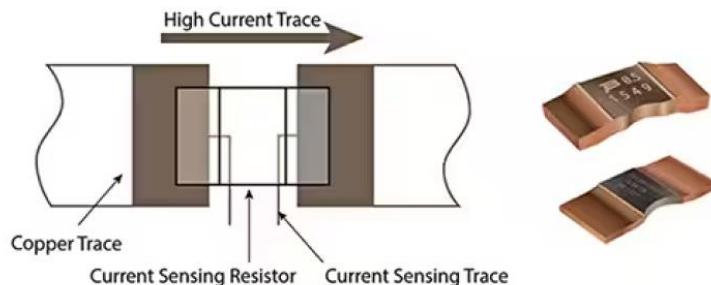


Figura 29 - Connessione shunt a due terminali, con connessione Kelvin.

Fonte: Steve Leibson, Nozioni di base sulla misurazione della corrente: Parte 1 – Resistori di rilevamento corrente (Immagine per gentile concessione di Bourns), p. 3

Queste tracce presentano comunque un'incertezza non trascurabile e che può compromettere il livello di accuratezza richiesto. Per tenere sotto controllo l'incertezza ed essere sicuri che questa sia simmetrica per ogni resistore di pista di sense, viene proposta una soluzione a quattro terminali, con **connessione Kelvin integrata**, mostrata in Figura 30. Con questa tecnologia, si possono controllare completamente tutte le tolleranze e i coefficienti di temperatura.

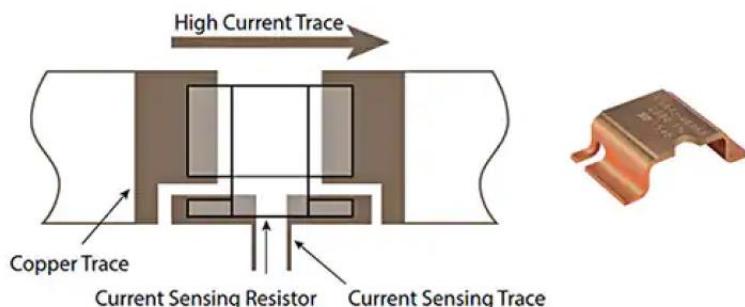


Figura 30 - Shunt con connessione Kelvin integrata.

Fonte: Steve Leibson, Nozioni di base sulla misurazione della corrente: Parte 1 – Resistori di rilevamento corrente, (Immagine per gentile concessione di Bourns), p. 5

Il passo successivo è la progettazione dello stadio di amplificazione, realizzato con un amplificatore da strumentazione (INA - Instrumentation Amplifier) [16]. Essi prevedono internamente due o tre amplificatori operazionali, a seconda della configurazione, e potrebbero anche avere integrati resistori di precisione tarati a laser, da usare per regolare il guadagno. L'amplificazione ha generalmente un valore che va da 20 a 60 e talvolta anche di più. Esistono modelli in cui il resistore di shunt è integrato internamente, ma per applicazioni ad alta potenza si preferisce il resistore esterno vista l'enorme quantità di calore da dissipare.

Esistono principalmente due configurazioni misurazione della corrente, mostrate in Figura 31: **low-side** e **high-side**, a seconda di dove viene posto lo shunt rispetto al carico e all'alimentazione.

La configurazione **low-side** ha lo shunt tra il carico e la massa, è semplice da implementare, perché la tensione di misurazione dello shunt è riferita a massa, e quindi non oltre qualche millivolt rispetto al potenziale di essa. Dato che la tensione è bassa non è richiesta alcuna reiezione di modo comune. Il metodo low side è quindi semplice ed economico da realizzare. Lo svantaggio è che però il carico non è più riferito a massa, potendo impedire il rilevamento di un cortocircuito tra il carico e la stessa, evento che potrebbe avvenire in un motore elettrico. Inoltre, la tensione di ingresso di modo comune deve includere la massa; normalmente ciò non interessa agli amplificatori funzionanti con alimentazione duale, ma può essere un problema per quelli ad alimentazione singola. Bisogna ricordare che non tutte le masse hanno lo stesso potenziale quando si trattano elevate potenze; dunque, bisogna tenere molto vicini tra loro i collegamenti a massa per ridurre al minimo la differenza di potenziale di questi, collegandoli ad esempio a stella. Quando la tensione di rilevamento della corrente è piccola la tensione di offset in ingresso dell'amplificatore potrebbe influire sulla misurazione, ecco perché bisogna scegliere attentamente l'operazionale da utilizzare.

Nonostante gli svantaggi elencati, l'architettura di misurazione della corrente low-side è una buona scelta se il carico non deve essere riferito a massa e se i cortocircuiti interni tra il carico e la massa non sono un problema o non è necessario che vengano rilevati dal circuito di misurazione della corrente. Tuttavia, per i progetti che devono soddisfare requisiti di sicurezza funzionale, la tecnica di misurazione della corrente high-side rappresenta la scelta migliore.

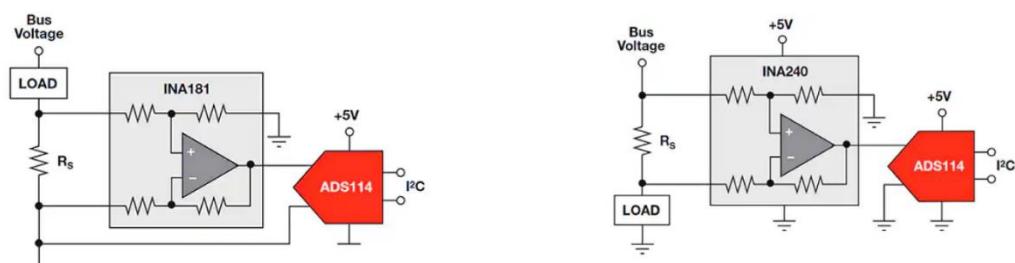


Figura 31 - Configurazione low-side a sinistra, high-side a destra.

Fonte: Steve Leibson, Nozioni di base sulla misurazione della corrente: Parte 2 – Amplificatori di rilevamento della corrente (Immagini per gentile concessione di Texas Instruments), pp. 2, 4

La configurazione **high-side** offre due vantaggi rispetto a quella appena vista:

- è facile rilevare un corto circuito tra carico e massa perché la corrente di corto svilupperà un'elevata tensione sul resistore di shunt
- dato che la misura non è riferita a massa le tensioni differenziali derivanti da correnti elevate che attraversano il piano di massa non influenzano la misurazione.

Questa tecnica però presenta uno svantaggio importante: richiede un'amplificazione con alto CMRR [16], e un intervallo di modo comune elevato.

Dopo aver deciso la configurazione più idonea all'applicazione da realizzare, bisogna scegliere se comprare un amplificatore con resistori integrati o esterni per l'impostazione del guadagno.

I vantaggi nell'utilizzare amplificatori con resistori integrati sono: la semplificazione dello schema e la riduzione del numero di componenti e la precisione del guadagno tarata a laser. Lo svantaggio è dunque quello di avere un guadagno impostato da fabbrica, non regolabile. Se l'applicazione, dunque, richiede un guadagno specifico per soddisfare altri criteri di progetto bisogna ricorrere a resistori esterni discreti, magari realizzati mediante trimmer regolabili manualmente o elettronicamente.

L'utilizzo di un resistore di shunt è una possibile ottimizzazione futura della tesi.

3.2.2 Sensori a effetto Hall

Una valida alternativa allo shunt è la misura tramite sensore ad effetto Hall, effetto elettromagnetico spiegato qui di seguito.

Un conduttore a forma di nastro sottile, mostrato in Figura 32, con una sezione $\Sigma = a * b$, è percorso da una corrente di intensità i e immerso in un campo magnetico B . Gli elettroni del flusso di corrente subiscono l'effetto di questo, secondo la Forza di Lorentz [16], e si spostano verso un lato del conduttore, creando una differenza di potenziale tra i lati del nastro, al quale viene misurata. Quindi questo sensore misura l'intensità del campo magnetico B nel quale viene immerso e produce in uscita una tensione detta tensione di Hall, E_h , proporzionale ad esso. Per completezza, sempre nella stessa figura, sono riassunte le principali formule per il progetto di un sensore di Hall, cosa di cui noi non ci occuperemo ma utilizzeremo un sensore già dimensionato.

$$\mathbf{j} = \frac{i}{ab} \mathbf{u}_x = nev_d \quad \text{Densità di corrente}$$

$$\mathbf{F} = ev_d \times \mathbf{B} \quad \text{Forza di Lorentz}$$

$$\mathbf{E}_H = \frac{\mathbf{F}}{e} = \mathbf{v}_d \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j}}{ne} \times \mathbf{B} \quad \text{campo elettromotore}$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

$$\mathcal{E}_H = \int_P^Q \mathbf{E}_H \cdot d\mathbf{z} = \mathbf{E}_H \cdot \mathbf{PQ} = \pm E_H b \quad \text{Tensione di Hall}$$

$$\mathcal{E}_H = E_H b = \frac{jBb}{ne} = \frac{iB}{nea}$$

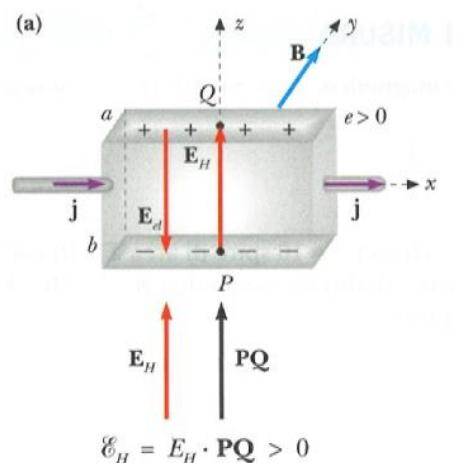


Figura 32 - Effetto Hall su un conduttore a forma di nastro sottile.

Fonte: P. Mazzoldi, M. Nigro, e C. Voci, Elementi di fisica. 2. Elettromagnetismo e onde, 3 ed. a cura di R.C. Iotti, G. Barbero. Napoli: Edises, 2021., pp. 153-154

Il campo magnetico può essere generato da varie fonti, tra cui un filo rettilineo percorso da corrente, come per il cavo di collegamento della batteria, secondo la legge di Biòt-Savart [17] mostrata in Figura 33. Conoscendo le caratteristiche di questo conduttore e misurando il campo magnetico che esso genera, sarà possibile ricavare, invertendo la formula, la corrente che lo attraversa.

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i a}{2\pi R \sqrt{R^2 + a^2}} \mathbf{u}_o$$

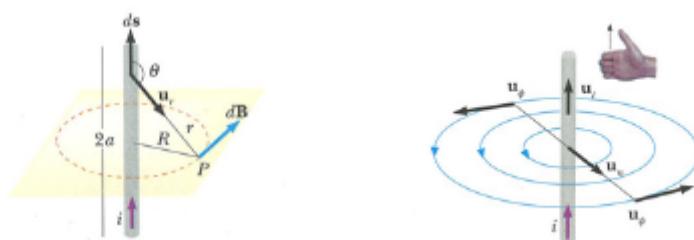


Figura 33 - Campo magnetico generato da un filo rettilineo e formula di Biòt Savart.

Fonte: P. Mazzoldi, M. Nigro, e C. Voci, Elementi di fisica. 2. Elettromagnetismo e onde, 3 ed. a cura di R.C. Iotti, G. Barbero. Napoli: Edises, 2021., pp. 175-176

I vantaggi di utilizzare sensori a effetto di Hall sono che la misura non è invasiva, il sensore può essere utilizzato come sensore di prossimità, posizionamento, rilevamento della velocità e della corrente; hanno una lunga durata di vita, non presentano problemi di usura meccanica; sono isolati galvanicamente e possono resistere a picchi di corrente molto superiori e a picchi di tensione senza essere danneggiati; può essere inserito in progetti complessi facilmente, perché i produttori li rendono disponibili con uscite già condizionate e pronte per l'utilizzo.

In commercio si trovano molte tipologie di sensori di hall dedicati alla misura di intensità di corrente elettrica. Alcuni di questi hanno dei pin dedicati al passaggio della corrente da misurare, in modo da creare un collegamento meccanico stabile tra il sensore e il cavo in cui scorre la corrente da misurare.

Il produttore Allegro [18] vanta di una grande varietà di modelli: per misurare corrente continua o alternata, con varie tensioni di alimentazione, bidirezionali o unidirezionali. Sul sito ufficiale i modelli vengono distinti in tre categorie, come mostrato in Figura 34.



Figura 34 - Categorie di sensori di Hall del sito Allegro Microsystem.

Fonte: Allegro Microsystem, Current sensor, <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics>

3.2.3 Misure di tensione

Le misure di tensione sono di facile realizzazione se si parla, come in questo caso, di tensioni di poche decine di volt. Infatti, gli stadi ADC convertono nativamente livelli di tensione in dati digitali. Questi convertitori hanno una tensione massima di ingresso, motivo per cui la tensione da misurare deve essere scalata, mediante un partitore di tensione, mostrato in Figura 35, la cui formula è riportata qui di seguito.

$$V_{out}(t) = V_{in}(t) * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (16)$$

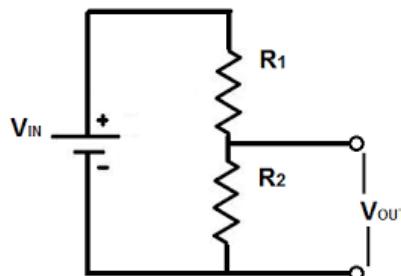


Figura 35 - Circuito Partitore di tensione.

Fonte: produzione propria

I resistori R_1 e R_2 devono essere dimensionati tenendo conto dell'effetto di carico che potrebbe presentarsi sull'uscita. Per ovviare questo effetto viene montato un buffer di tensione in serie all'uscita. La resistenza d'ingresso di questi dispositivi, realizzati con

amplificatori operazionali, è dell'ordine dei megaohm; quindi, i resistori potranno essere dell'ordine di centinaia di kiloohm. Infine, per ridurre il rumore in uscita, si può montare un filtro passa basso [16].

3.3 PCB di acquisizione

È stato scelto di utilizzare un sensore di Hall per la misura della corrente, perché in commercio ci sono molti modelli che forniscono in uscita un'uscita già condizionata e pronta per essere acquisita da un microcontrollore; in futuro potrebbe essere preferibile utilizzare un resistore di shunt, con INA, ed eventualmente un ADC esterno, per questioni di accuratezza; oppure si potrebbe scegliere l'economicità della soluzione da implementare, abbassando l'accuratezza della misura. Queste considerazioni verranno trattate nelle conclusioni.

In Figura 36 viene riportato lo schema elettrico, mentre in Figura 37 viene riportato il design del PCB ed in Figura 38 la sua realizzazione.

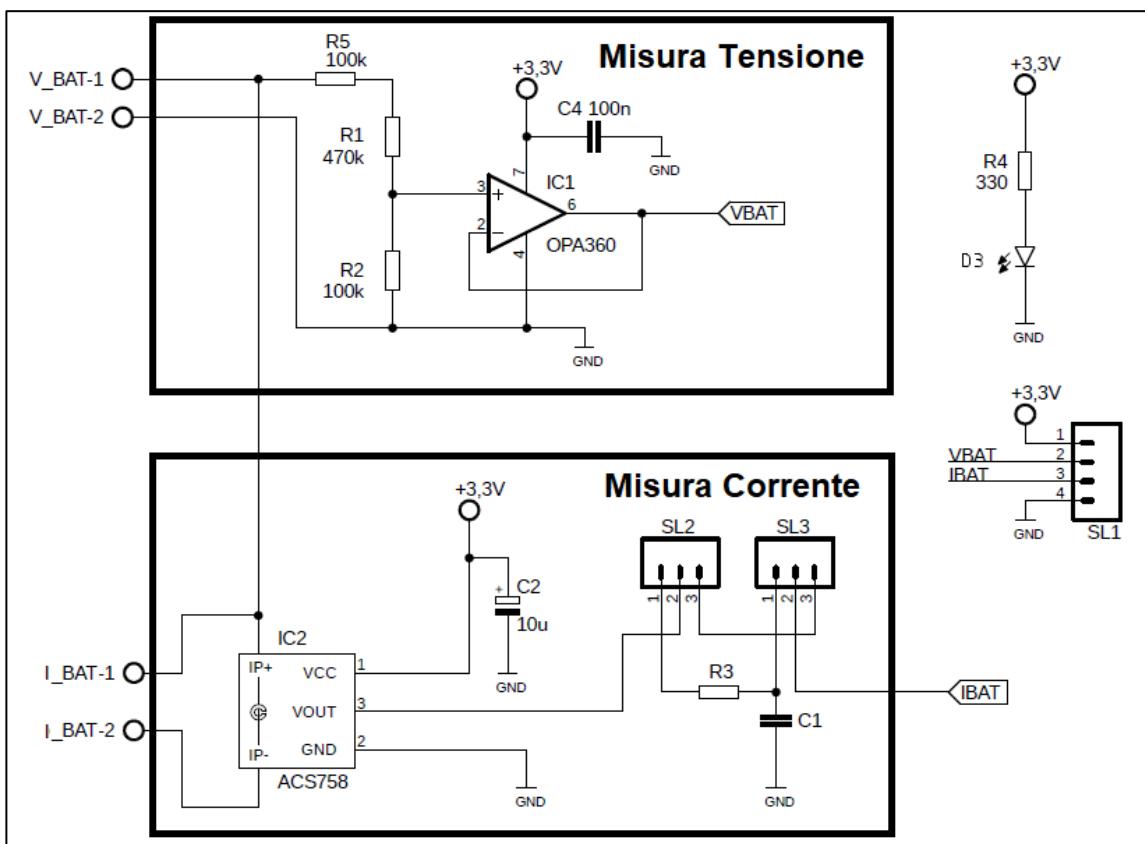


Figura 36 - Schema elettrico del PCB di acquisizione.

Fonte: produzione propria

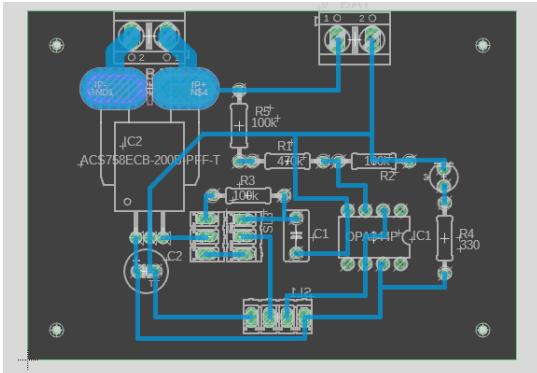


Figura 37 - Design del PCB.

Fonte: produzione propria

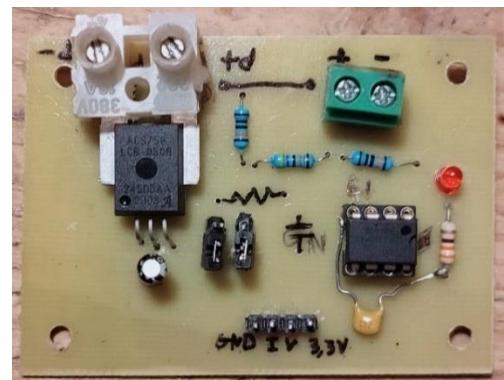


Figura 38 - PCB realizzato.

Fonte: produzione propria

Tra i vari modelli in commercio è stato scelto il sensore di Allegro Microsystem ACS758LCB-050B [19] (IC2), alimentato a 3,3V, con un'uscita analogica che va collegata direttamente all'ADC del microcontrollore. Si è deciso di predisporre la possibilità di inserimento di un filtro RC passa basso del primo ordine [16], selezionabile tramite due (SL2 e SL3) jumper, che modificano del circuito. Le caratteristiche di questo sensore verranno analizzate nel paragrafo 4.3.

Per quanto riguarda l'acquisizione della tensione ai capi della batteria è stato realizzato un partitore di tensione, in modo da scalare la tensione dal range di 0-22V massimi, a 0-3,3V massimi degli ingressi analogici del microcontrollore.

I calcoli sono stati effettuati fissando i valori: $V_{out} = 22V$, $V_{in} = 3,3V$ e $R_2 = 1k\Omega$ (R2), per poi ricavare il valore di R_1 , invertendo la (15), ottenendo un valore di resistenza pari a $R_1 = 5,66k\Omega$. Questo valore non è uno standard commerciale, quindi è stato ottenuto un valore di $R_1 = 570k\Omega$ mettendo in serie un resistore da $100k\Omega$ (R5) con uno da $470k\Omega$ (R1).

Il partitore è seguito da un buffer, realizzato con l'amplificatore operazionale OPA360 [20] (IC1), il quale è rail-to-rail in modo da poter raggiungere in uscita il livello di tensione pari all'alimentazione dell'integrato.

Per comodità, in modo da eliminare un cavo di collegamento esterno, il terminale + della misura di tensione è collegato high-side, direttamente al terminale P+ del sensore di corrente. Bisogna tenere presente che quest'ultimo dovrà essere collegato il terminale positivo della batteria. Il riferimento di massa (GND), connesso al terminale della batteria, è comune per sensore di corrente, per l'acquisizione di tensione e per il microcontrollore. Il sensore, essendo bipolare, è in grado di misurare le correnti fluenti in esso da entrambi i sensi; per avere una lettura positiva il verso della corrente deve scorrere dal terminale P+ al terminale P-, viceversa per avere una corrente negativa.

Sulla scheda sono stati inseriti: un connettore doppio a vite (V_BAT-1/2), collegato tra massa e il terminale P+, per inserire i cavi di collegamento verso i terminali della batteria; un connettore doppio a vite (I_BAT-1/2), collegato ai terminali P+ e P- del sensore di corrente, per inserire i cavi attraverso i quali scorrerà la corrente del circuito da misurare; un condensatore di bypass per filtrare l' alimentazione del sensore di corrente (C2) e un altro condensatore di bypass (C4) per filtrare l'alimentazione dell'amplificatore operazionale; un led (D3) in serie a un resistore (R4) per segnalare l'effettiva alimentazione della scheda; un connettore per collegarsi alla scheda Nucleo (SL1).

Tenendo presente queste considerazioni è stato progettato lo schema elettrico e successivamente il PCB, utilizzando il software “Autodesk Fusion 360”.

È stata poi progettata e stampata, utilizzando una stampante 3D, un alloggiamento in PLA, per contenere la scheda Nucleo (descritta in 3.4.1) e il PCB, così da avere tutto ben saldo con delle viti ed evitare cortocircuiti. Inoltre, i collegamenti del circuito dove fluirà la corrente di scarica o di carica, verranno effettuati tramite cavi con diametro elevato in modo da poter sopportare grandi valori di corrente, fissati con mammut alla scheda per maggiore solidità meccanica.

Infine, un cavo composto da quattro fili (corrispondenti ai segnali “3,3V”, “VBAT”, “IBAT”, “GND”). collega il PCB alla Nucleo. Il sistema complessivo viene mostrato in Figura 39.

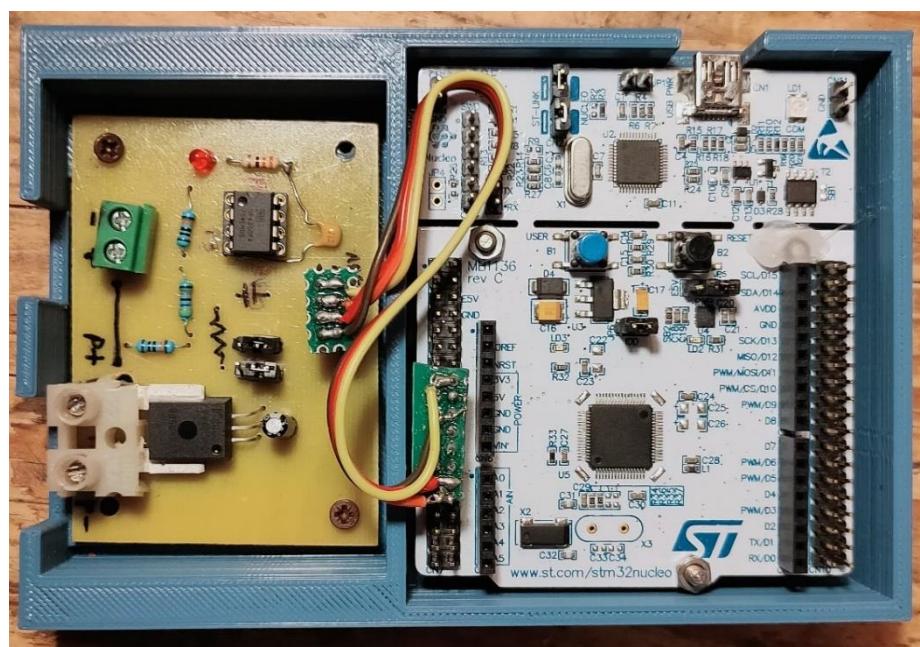


Figura 39 - Sistema di acquisizione realizzato, nel suo alloggiamento stampato in 3D.

Fonte: produzione propria

3.4 Il microcontrollore utilizzato e il progetto del firmware

3.4.1 Microcontrollori basati su Arm® 32-bit

Il gruppo di processori Arm® Cortex®-M è una serie di core ottimizzati per l'efficienza energetica e il funzionamento deterministico. Esso è ampiamente utilizzato nei microcontrollori (MCU) e può anche essere incorporato in microprocessori (MPU) multi-core [21].

La famiglia, oltre che dagli iniziali Cortex®-M3, è composta da processori ottimizzati per:

- il basso consumo energetico, come il Cortex®-M0 e il Cortex®-M0+;
- le alte prestazioni, con il Cortex®-M7;
- il real-time, con il Cortex®-M4;
- la sicurezza, con il più recente Cortex®-M33.

La STMicroelectronics ha adottato per prima i core Arm® Cortex®-M e guida il mercato con il più ampio portafoglio di MCU Cortex®-M a 32 bit [22].

L'utilizzo di questa architettura standardizzata porta i seguenti vantaggi:

- la portabilità del codice da una serie di MCU a un'altra;
- un compromesso tra efficienza energetica, prestazioni di calcolo, sicurezza e ampia gamma di periferiche;
- velocità di sviluppo del software grazie alla vasta platea di utilizzatori e alla disponibilità di librerie software collaudate e open source.

I microcontrollori disponibili dal venditore sono innumerevoli, divisi in categorie per facilitarne la scelta. Viene mostrato un generico package in Figura 40.



Figura 40 - Microcontrollore STM32 generico.

Fonte: STMicroelectronics, https://www.st.com/content/st_com/en.html

È stato scelto un microcontrollore della serie L1, l'STM32L152RE, fornito su una comoda scheda di prototipazione chiamata Nucleo Board, mostrata in Figura 41, la quale permette di eseguire la programmazione e il debug del micro con connettori comodi per il collegamento di circuiti elettrici esterni.

Si sarebbe potuto scegliere microcontrollori più recenti, ottimizzati ancor di più per il low power, ma è stata fatta questa scelta per il basso costo di acquisto.

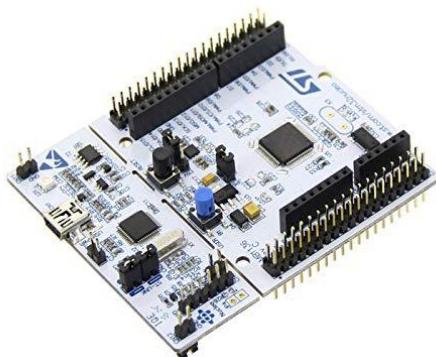


Figura 41 - Nucleo Board, con microcontrollore STM32L152RE.

Fonte: STMicroelectronics, https://www.st.com/content/st_com/en.html

3.4.2 Il microcontrollore STM32L152RE

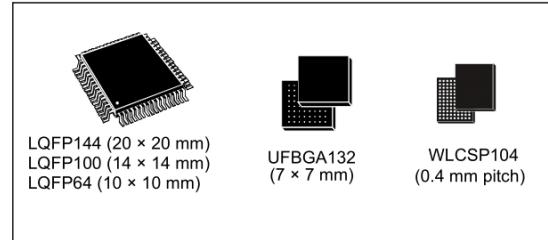
Il microcontrollore STM32L152RE [23] fa parte della famiglia di controllori L1 [24], serie ultra-low-power, progettati per applicazioni medicali, industriali e applicazioni generiche. Viene riportato il datasheet in Figura 42, dal quale leggiamo alcune caratteristiche di nostro interesse: funziona con un'alimentazione da 1,8 a 3,6 V (fino a 1,65 V allo spegnimento); è disponibile negli intervalli di temperatura da -40 a +85 °C e da -40 a +105 °C; ha al suo interno molti dispositivi. Di questi, nel progetto verrà utilizzato l'ADC, un output digitale (collegato al led presente sulla scheda), un timer e una USART (più una già impostata e dedicata per collegare il futuro modulo di comunicazione wireless. Vista la numerosità dei dispositivi disponibili questo micro è ben predisposto per soddisfare future implementazioni.

In Figura 43 viene mostrata l'architettura interna del microcontrollore, descrivendo poi in dettaglio i dispositivi utilizzati.

Features

Includes ST state-of-the-art patented technology

- Ultra-low-power platform
 - 1.65 V to 3.6 V power supply
 - **-40 °C to 105 °C** temperature range
 - 290 nA Standby mode (3 wakeup pins)
 - 1.11 µA Standby mode + RTC
 - 560 nA Stop mode (16 wakeup lines)
 - 1.4 µA Stop mode + RTC
 - 11 µA Low-power run mode down to 4.6 µA in Low-power sleep mode
 - 195 µA/MHz Run mode
 - 10 nA ultra-low I/O leakage
 - 8 µs wakeup time
- Core: Arm® Cortex®-M3 32-bit CPU
 - From 32 kHz up to 32 MHz max
 - 1.25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1)
 - Memory protection unit
- Up to 34 capacitive sensing channels
- CRC calculation unit, 96-bit unique ID
- Reset and supply management
 - Low-power, ultrasafe BOR (brownout reset) with 5 selectable thresholds
 - Ultra-low-power POR/PDR
 - Programmable voltage detector (PVD)
- Clock sources
 - 1 to 24 MHz crystal oscillator
 - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
 - Internal 16 MHz oscillator factory trimmed RC(+/-1%) with PLL option
 - Internal low-power 37 kHz oscillator
 - Internal multispeed low-power 65 kHz to 4.2 MHz oscillator
 - PLL for CPU clock and USB (48 MHz)
- Pre-programmed bootloader



- USB and USART supported
- Up to 116 fast I/Os (102 I/Os 5V tolerant), all mappable on 16 external interrupt vectors
- Memories
 - 512 Kbytes of Flash memory with ECC (with 2 banks of 256 Kbytes enabling RWW capability)
 - 80 Kbytes of RAM
 - 16 Kbytes of true EEPROM with ECC
 - 128-byte backup register
- LCD driver (except STM32L151xE devices) up to 8x40 segments, contrast adjustment, blinking mode, step-up converter
- Rich analog peripherals (down to 1.8 V)
 - 2x operational amplifiers
 - 12-bit ADC 1 Msps up to 40 channels
 - 12-bit DAC 2 ch with output buffers
 - 2x ultra-low-power comparators (window mode and wake up capability)
- DMA controller 12x channels
- 11x peripheral communication interfaces
 - 1x USB 2.0 (internal 48 MHz PLL)
 - 5x USARTs
 - Up to 8x SPIs (2x I2S, 3x 16 Mbit/s)
 - 2x I²Cs (SMBus/PMBus)
- 11x timers: 1x 32-bit, 6x 16-bit with up to 4 IC/OC/PWM channels, 2x 16-bit basic timers, 2x watchdog timers (independent and window)
- Development support: serial wire debug, JTAG and trace

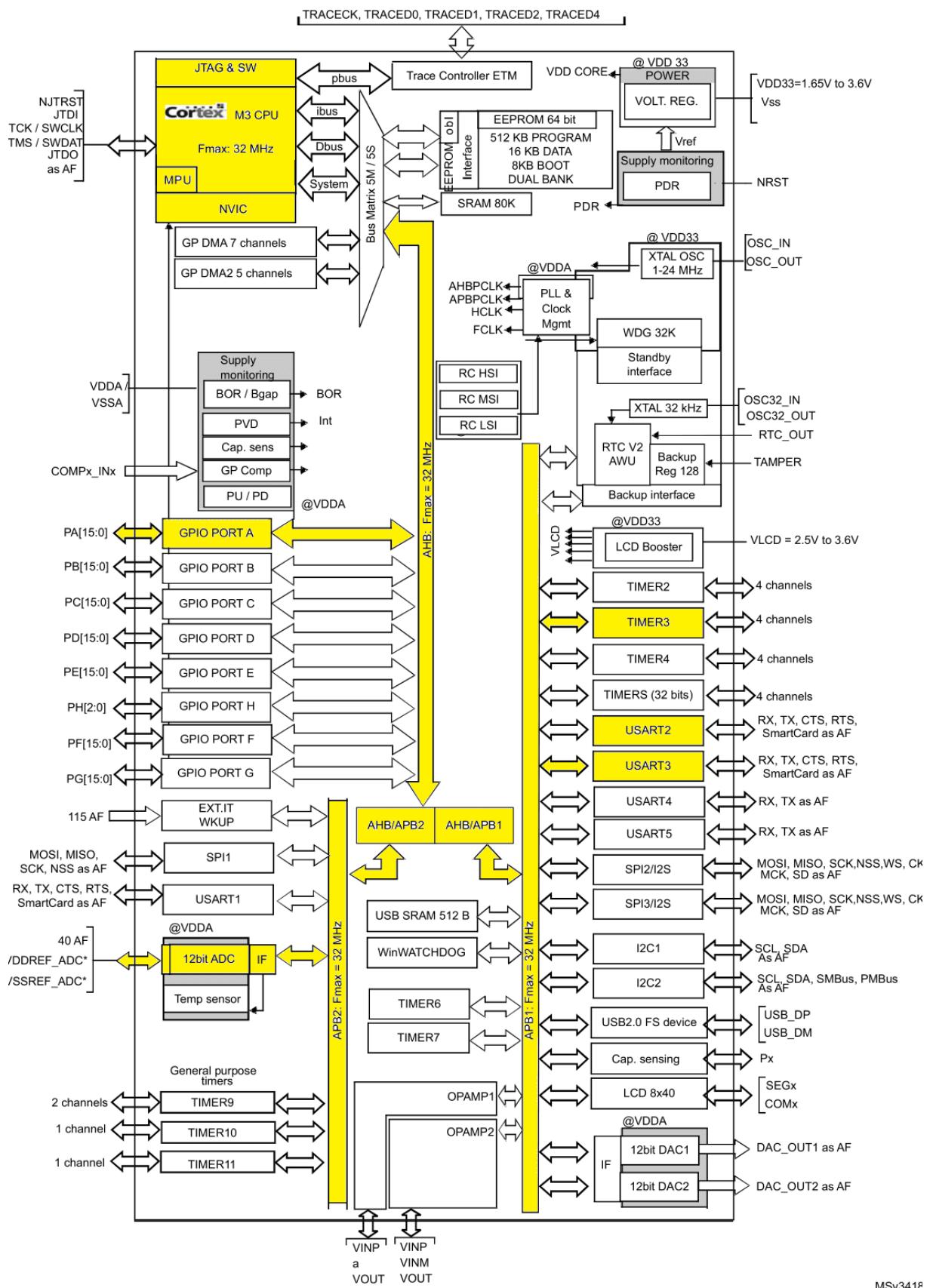


Figura 43 - Architettura interna e periferiche principali utilizzate (in giallo).

Fonte: STMicroelectronics, https://www.st.com/content/st_com/en.html

Come anticipato il microcontrollore è basato su core il Cortex M3, collegato alle periferiche tramite vari bus. Vi sono anche i blocchi di gestione del clock e dell'alimentazione e altri più specifici, la cui descrizione in dettaglio è rimandata a [23]

Vengono ora descritta la configurazione dei dispositivi utilizzati:

- Il **microcontrollore** è stato fatto funzionare a una frequenza di 32MHz, come di default, in un futuro momento verrà abbassato;
- Il timer utilizzato è il **TIM3** a 16 bit, il quale viene fatto funzionare alla stessa frequenza di clock ma con un prescaler impostato a 31, ottenendo così un periodo del singolo colpo di clock a 1 microsecondo. È stato poi settato per contare in up, ovvero va da 0 al valore del registro di auto reload, posto a 999, in modo da resettarsi ogni millisecondo. Ad ogni reset viene generato un interrupt, usato come base dei tempi della FSM;
- L'**ADC**, da 12 bit ad approssimazioni successive, è stato fatto funzionare in “single conversion mode”, ovvero converte il singolo canale selezionato e poi si ferma, con un sampling time di 4 colpi di clock di sistema. Per eseguire una successiva conversione deve essere fatto ripartire da codice. È stata scelta questa modalità per avere il totale controllo del convertitore. Considerazioni sull'ottimizzazione verranno fatte conclusioni. I canali da convertire sono lo IN0 e IN1;
- La **USART2** è stata configurata in modo da essere usata dall'IDE come monitor seriale, utile per monitorare l'output del micro. Il Baud è a 115200, il formato è 8N1, non vengono usati i controlli di parità e di flusso. In secondo momento viene anche utilizzata per inviare i dati al data logger in Python descritto nel paragrafo 4.5.2.
- La **USART3** viene riservata e configurata per collegare il futuro modulo wireless;
- Il **GPIO PA5** è stato impostato per funzionare come output digitale. È collegato un led incorporato sulla Nucleo Board. Questo verrà usato come pin di debug per le tempistiche di conversione dell'ADC, nel paragrafo 4.5.

3.4.3 Struttura del firmware

Il firmware che gestisce il microcontrollore deve essere scritto in modo che:

- Generi un interrupt creare la base dei tempi;
- Utilizzi l'ADC per acquisire i segnali di tensione corrispondenti alla corrente e alla tensione della batteria;
- Invii i dati elaborati su seriale.

La scelta proposta serve a dimostrare che si riesce a comandare il micro per svolgere i compiti appena elencati. L'ottimizzazione, la gestione intelligente del tutto e proposte alternative vengono trattate successivamente nelle conclusioni.

Verranno acquisiti segnali con lenta dinamica (banda limitata nell'ordine delle decine/centinaia di Hz), e non segnali complessi come ad esempio quelli audio, si è deciso di usare come base dei tempi un interrupt generato ogni 1ms e un tempo di campionamento rilassato, Tc, di 0,5s.

In Figura 44 viene illustrato il diagramma temporale di conversione A/D. la singola coppia di acquisizioni viene definita come “**misura**”, e contiene l'acquisizione dei segnali di corrente e tensione, prodotti dal PCB illustrato nel paragrafo 3.3, sui canali IN0 e IN1 dell'ADC. Per effettuare una “**misura mediata**” vengono eseguite N misure e successivamente mediate dal microcontrollore.

La gestione della conversione analogico digitale dei due canali deve:

- far in modo che le singole letture siano ravvicinate (la distanza temporale tra le due deve essere trascurabile rispetto alla dinamica dei segnali), così da poterle approssimare come se fossero state eseguite nello stesso istante;
- inserire un “Delay1”, non bloccante, tra una misura e la successiva
- eseguire N misure e poi aspettare un “Delay2”, non bloccante, più lungo del precedente, in modo da aspettare fino a che non sia raggiunto l'intervallo Tc prima di eseguire una nuova misura mediata.

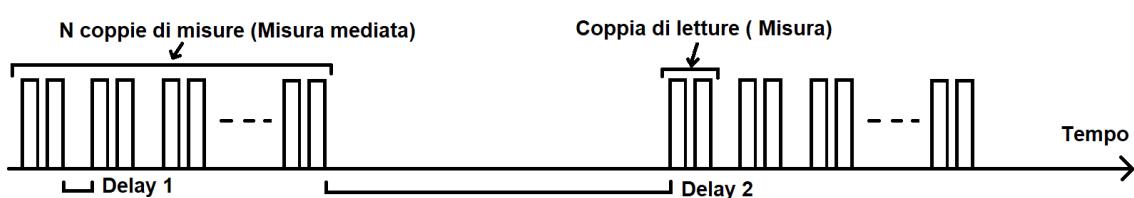


Figura 44 - Diagramma temporale delle conversioni eseguite dall'ADC.

Fonte: produzione propria

È stato scelto di effettuare in questo modo le misure in modo da avere un continuo flusso di dati, filtrati mediando i campioni, da poter analizzare per studiare il comportamento effettivo del sistema realizzato.

Il monitoraggio continuo è dispendioso in termini di consumo energetico, una gestione intelligente del monitoraggio viene proposta nelle conclusioni.

Il programma è stato progettato come una macchina a stati finiti (FSM), la cui evoluzione è dettata dal segnale di clock generato dall'interrupt di un timer.

In Figura 45 viene rappresentata sinteticamente la FSM in questione. Quando viene avviato il programma, la macchina a stati si avvia e continua in un loop infinito. I quattro stati che la compongono sono:

- **"Misura"**: viene letta e convertita la coppia di canali, CH0 (corrispondente all'uscita del sensore di corrente) e CH1 (corrispondente al circuito di misurazione della tensione della batteria) dell'ADC, salvando i valori in un buffer;
- **"Wait 1"**: aspetta un tempo "Delay1" prima di eseguire la prossima misura;
- **"Media"**: viene eseguita la media aritmetica sulle N copie di lettura;
- **"Wait 2"**: si aspetta fino a che il tempo non valga Tc prima di tornare a eseguire una nuova misura. In questo stato viene implementata la comunicazione seriale, e verrà utilizzato anche per eseguire funzioni future.

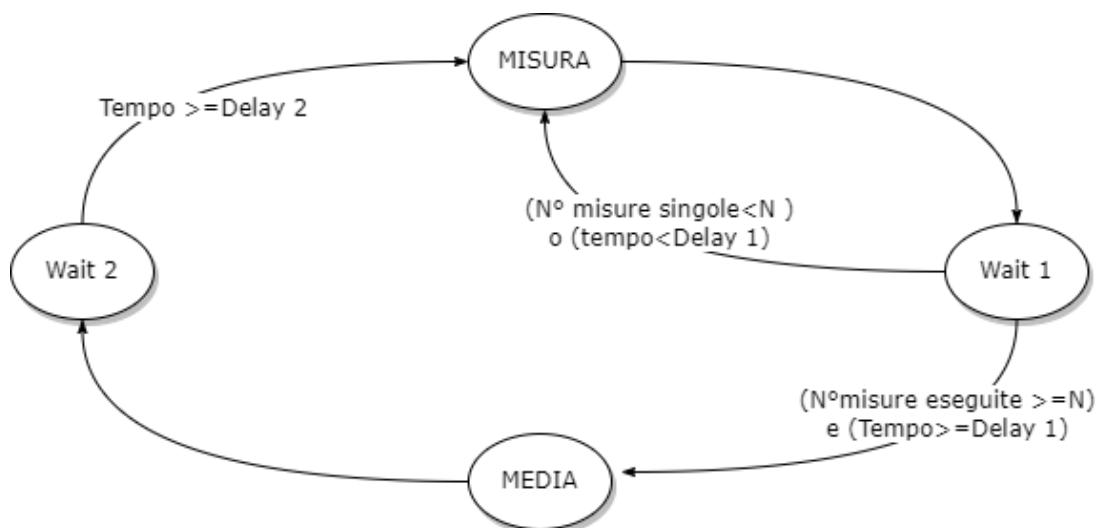


Figura 45 - Macchina a stati del firmware.

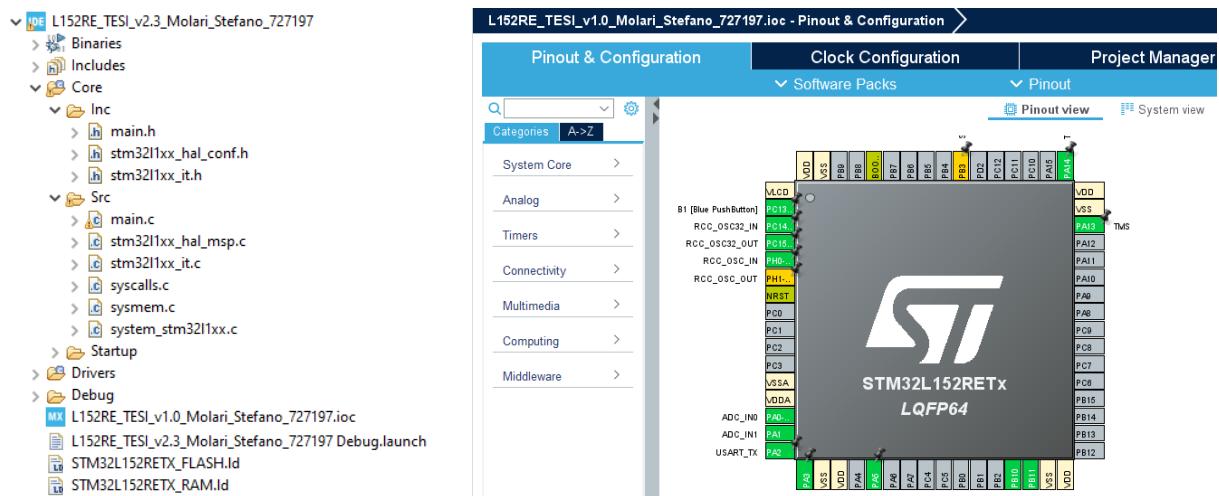
Fonte: produzione propria

3.4.4 Implementazione del firmware

È stata utilizzata l'IDE fornita dal produttore, “CUBE IDE” per scrivere il programma nel linguaggio C. Essa permette di fare la build del codice, eseguirlo ed effettuare il debug del microcontrollore.

Sono stati selezionati e settati i dispositivi di interesse per il progetto, presenti nel microcontrollore, attraverso il tool “CUBE MX”. Questo tool, mostrato in Figura 46 è molto comodo perché una volta impostati i parametri genera in automatico il codice di base per poter gestire e utilizzare i dispositivi selezionati.

Il codice da scrivere è dunque quello che implementa la logica di funzionamento per ottenere gli scopi desiderati. È stata inoltre usata stata usata la libreria “HAL” (Hardware Abstraction Layer) della famiglia L1, che fornisce molte funzioni ad alto livello di astrazione dall’HW utili, le quali facilitano il pilotaggio di dei dispositivi via software.



intervallo di tempo pari a “Delay2”. Gli N campioni, una volta sommati nell'apposita variabile, vengono mediati eseguendo la divisione tramite shift logico per non usare operazioni dispendiose numericamente.

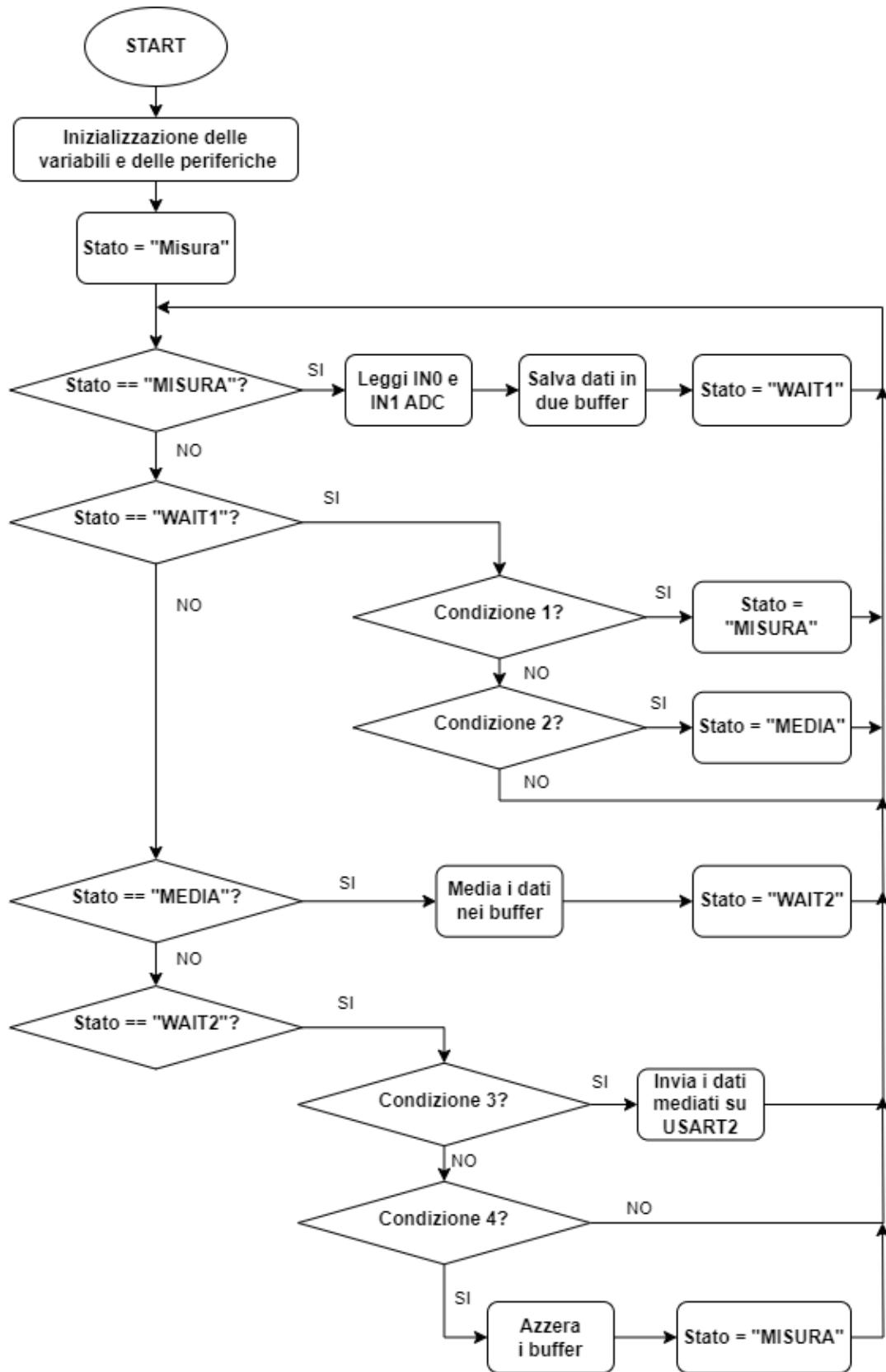


Figura 47 – Flow chart semplificato del firmware del microcontrollore scritto in C.

Fonte: produzione propria

I file principalmente utilizzati sono: "main.h", "main.c", "stm32l1xx_it.c"; le cui parti principali implementate verranno riportate e descritte ora.

In "main.h" è stato aggiunto uno **struct** per salvare il tempo attuale della macchina a stati.

```
typedef struct{
    int ms;      // millisecondi
    int s;       // secondi
    int min;     // minuti
    int hour;    // ore
    int day;     // giorni
}Time;
```

In "stm32l1xx_it.c" è stata inserita la subroutine da eseguire ogni volta che il timer "TIM3" genera un interrupt.

```
void TIM3_IRQHandler(void)
{
    HAL_TIM_IRQHandler(&htim3);
    time.ms++;
}
```

In "main.c" sono inserite le costanti, variabili globali, funzioni e il ciclo main.

Sono state definite le seguenti costanti:

```
#define N_MEAS 8      // numero di campioni di misura da mediare
#define SIZE_AVG 3    // Log2 N_MEAS, per la divisione eseguita con shift
#define ROUND 4        // arrotondamento per la divisione eseguita con shift
#define MEASURE_TIMEOUT 1 // intervallo di tempo tra una misura e la successiva
#define VREF 3.3        // tensione di riferimento dell'ADC
#define TIM_MAX_COUNT 999 // valore oltre il quale si resetta il timer
#define TC 499          // 249=0,25s; 499=0,5s; 999=1s
```

È stato definito un **enum** per gestire i nomi degli stati:

```
typedef enum {
    MISURA, WAIT1, MEDIA, WAIT2
}StateName;
```

Le **variabili** definite sono:

```
Time time;                      // tempo corrente
StateName state;                // stati della FSM
uint32_t CH0=0;                 // pin analogico 0
uint32_t CH1=0;                 // pin analogico 1
uint32_t current[N_MEAS];       // vettore di correnti
uint32_t tension[N_MEAS];       // vettore di tensioni
uint32_t current_sum = 0;        // somma del vettore di correnti
uint32_t tension_sum = 0;        // somma del vettore di tensioni
float avg_current=0;            // corrente media
float avg_tension=0;             // tensione media
int meas_index =0;               // indice che indica il numero di misure eseguite
```

4 VERIFICA Sperimentale

4.1 Analisi preliminare della componentistica

Per poter monitorare la carica e la scarica della batteria in dotazione è stato necessario capire il range di correnti e tensioni in gioco e come fosse gestito a grandi linee il processo di ricarica del caricabatterie Makita in dotazione.

La batteria, al momento della consegna dei materiali, era già carica e il carico elettronico della Keysight non era ancora disponibile (tantomeno era ancora stato sviluppato il software in Python). È stato dunque creato un primo circuito resistivo, mostrato in Figura 48, per poter scaricare la batteria.

I resistori a disposizione erano di pochi valori, inoltre con bassa potenza dissipabile. È stato possibile realizzare un circuito resistivo di circa 10Ω misurati (con il multmetro palmare “Iso-Tech IDM101” [25]), il miglior compromesso tra valore di resistenza e potenza dissipabile con quei componenti. Per evitare che il tutto si surriscaldasse sono state montate due ventole per dissipare meglio il calore.

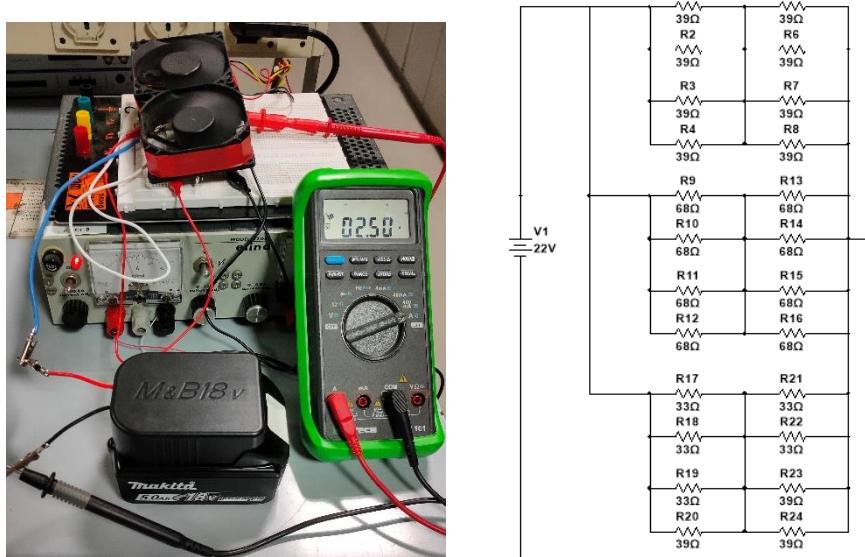


Figura 48 - Scarica della batteria attraverso il circuito resistivo, rappresentato schematicamente a destra.

Fonte: produzione propria

La batteria è stata dunque scaricata, osservandone approssimativamente il livello della carica attraverso l'indicatore led a quattro livelli integrato nella scocca, fino all'ultimo led luminoso di indicazione.

Si è poi iniziato a indagare quanta corrente e con che profilo di tensione venisse ricaricata la batteria dal caricabatterie. Il collegamento tramite cavi dei due poli della

batteria al caricatore non basta per iniziare il processo di ricarica, difatti lo strumento emette un suono di allarme che indica la batteria montata come difettosa. Ciò è spiegabile dalla presenza di un circuito di protezione e di interfacciamento con il BMS nel caricatore. È stata quindi realizzata una prolunga che collegasse i due connettori gialli a 7 pin, in modo da ingannare il caricabatterie, come se la batteria fosse posta nel suo alloggiamento. Un amperometro e un voltmetro [25] sono stati utilizzati per misurare le grandezze in gioco, inoltre è stato collegato un analizzatore logico [26] ai sette pin del connettore, mostrati entrambi in Figura 49. Il pin 4 era un presunto pin analogico, il quale forniva una tensione continua, probabilmente riferita alla singola cella, ma non si è indagato oltre.

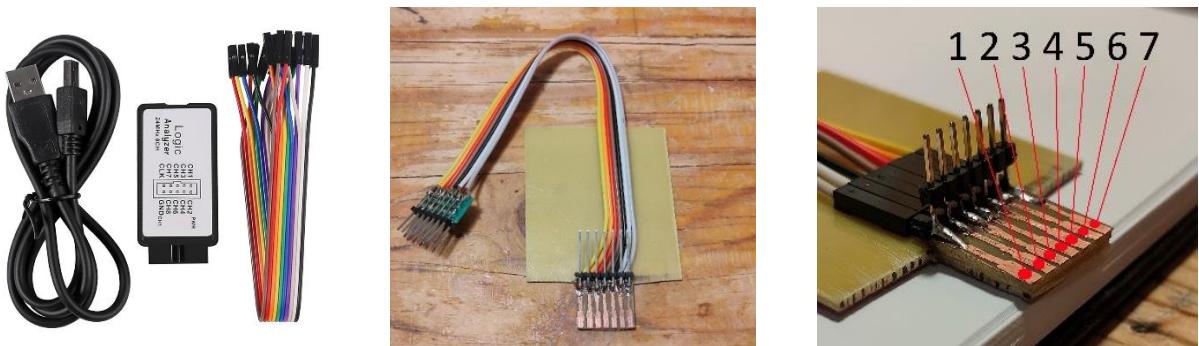


Figura 49 - A sinistra l'analizzatore logico, in centro il connettore artigianale, a destra il pinout di questo.

Fonte: a) ISTOVO, ISTOVO 2 terminazioni USB Logic Analyzer 24 MHz 8 Canale 24 M/Seconds Logic Analyzer Debugger per ARM FPGA Logic Analyzer Logic Analyzer 24 M 8 CH, Amazon <https://www.amazon.it/ISTOVO-terminazioni-Analyzer-Seconds-Debugger/dp/B0CDLY4KK7>

b) e c) produzione propria

Dopo aver collegato il tutto, come mostrato in Figura 50, è stato avviato il processo di ricarica, la quale prima analisi in dettaglio è stata riportata nel 4.2, accenniamo al fatto che sono state misurate correnti massime di 9A e tensioni dai 16V ai 22V circa.

Osservando invece i dati ottenuti dall'analizzatore logico possiamo notare che il connettore viene utilizzato per comunicare serialmente principalmente all'inizio e alla fine del processo di carica, come se ci sia un protocollo di comunicazione tra il caricabatterie e la batteria.



Figura 50 - Setup sperimentale per il monitoraggio dei pin digitali del connettore giallo.

Fonte: produzione propria

4.2 Prima misura qualitativa della carica

All'inizio dell'attività sperimentale, non avendo ancora sviluppato integralmente il software in Python (il cui sviluppo ha richiesto molto tempo) è stata osservata la corrente di carica utilizzando un amperometro palmare [25], il quale non permette il log automatico dei dati. Per tener traccia dei valori di corrente collezionati manualmente mantenendo un buon riferimento temporale, è stato fatto un video al multimetro palmare, con a fianco il monitor del PC che mostrava l'ora esatta. I dati sono stati presi e trascritti a mano dal video. Sarebbe stato utile avere un amperometro con portata di almeno 10A con possibilità di log automatico. Per quanto riguarda la tensione ai capi della batteria invece è stato possibile utilizzare il multimetro digitale Agilent 34411A [27] con un primordiale programma in Python che ha permesso di campionare e salvare il livello della tensione ogni 0,5s in un file di testo. In Figura 51 viene mostrato il setup sperimentale appena descritto.



Figura 51 - Monitoraggio della ricarica, con il log dati fatto a mano.

Fonte: produzione propria

Viene ora mostrato, nel grafico presente in Figura 52, l'andamento della tensione V_{bat} nel tempo. È stato preso un numero considerevole di punti, circa 5000, ciascuno distante di 0,5s. Come mostrato in Figura 53 è invece mostrato un ingrandimento di un pezzo di grafico, che evidenzia un andamento di tipo esponenziale.

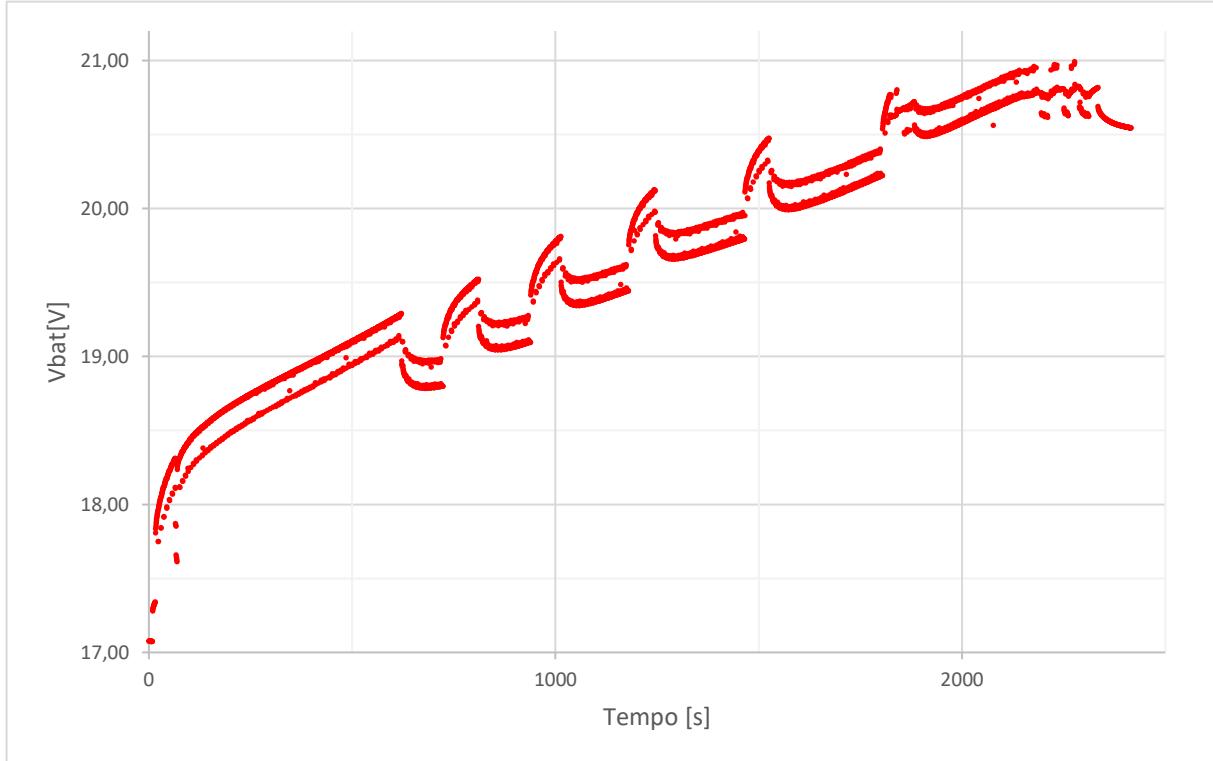


Figura 52 - Tensione della batteria in funzione del tempo durante la ricarica.

Fonte: produzione propria

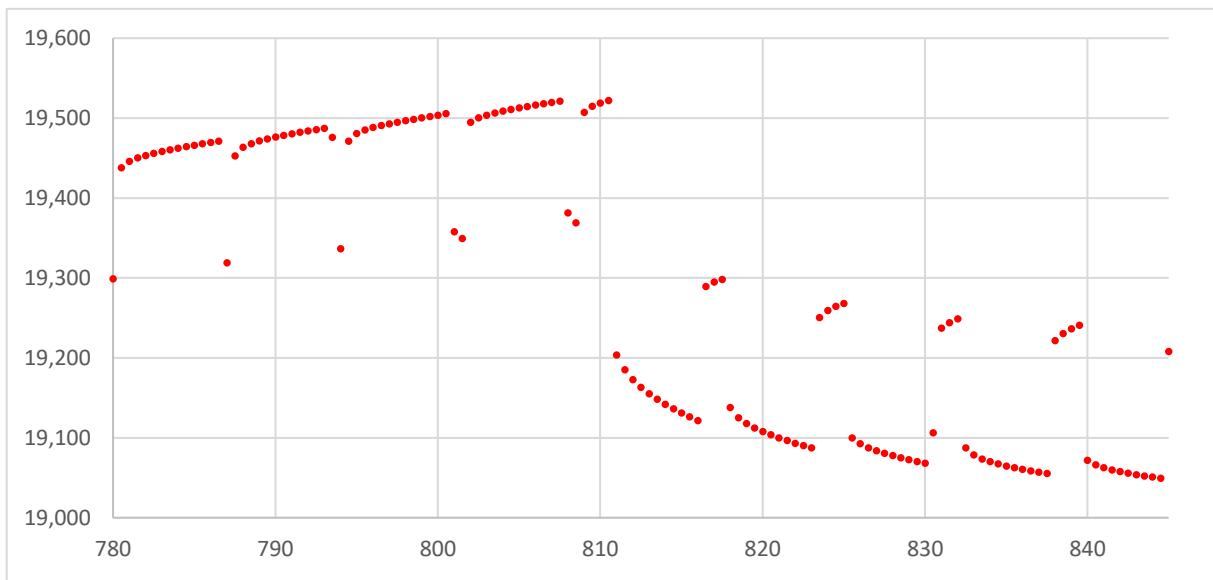


Figura 53 - Ingrandimento di una parte del grafico in Figura 52.

Fonte: produzione propria

L'andamento della tensione sembra essere l'andamento caratteristico che si ritrova nella tecnica di ricarica a impulsi [28], utilizzata per allungare la vita delle batterie agli

ioni di litio. Questa tecnica può essere eseguita utilizzando correnti ad impulsi con ampiezza e duty cycle regolabili, con fasi alterne. Tra le varie tipologie di ricarica pulsata questa sembra essere “positiva-negativa”, caratterizzata da pulsazioni di carica seguite da pulsazioni di scarica; infatti, sono state osservate fasi in cui:

- L'andamento della tensione ha pendenza positiva, indicando una fase di carica, con il duty cycle maggiore dell'80%;
- L'andamento della tensione ha pendenza negativa, indicando una fase di scarica, con il duty cycle inferiore al 30%.

Nel complesso:

- all'avvio del processo di ricarica, c'è un periodo iniziale, nel quale la tensione cresce e poi torna al livello di partenza;
- successivamente c'è periodo più lungo del precedente, ma con le stesse altre caratteristiche;
- poi si alternano periodi in cui la tensione diminuisce, con periodi in cui mediamente risale;
- una fase finale in cui i periodi con pendenza positiva e negativa si alternano velocemente per poi convergere a un valore finale di tensione, dopo la quale si arresta il processo di ricarica.

La corrente assume solo quattro diversi valori (a meno di pochi milliampere) durante il processo: 0A, 2,7A, 6A, 9A. All'inizio del processo di ricarica, sembra che venga testata la batteria fornendo quasi subito 9A per poi fermarsi. Poi parte una fase in cui la corrente viene alternata tra i valori di 9A e 6A. Dopo questa fase la corrente si alterna tra 2,7A, 6A e 9A continuamente, per poi finire alternandosi tra 6A, 2,7A fino ad arrestarsi a 0A. potremo apprezzare meglio questo andamento quando verrà eseguito il log automatico nel paragrafo 4.8.

Per dimostrare che si può stimare la carica di una batteria integrando la corrente nel tempo è stato diviso l'andamento della corrente a seconda delle diverse fasi, per un totale di 12 periodi diversi, definiti in Tabella 7. In ciascun periodo viene calcolata la corrente media, per poi calcolare la carica immessa nella batteria durante quel periodo. In Tabella 8 viene riportata la tabella di lavoro, con la quale è stata possibile stimare integrando la corrente media nei vari intervalli un trasferimento di carica pari a 4018 mAh durante il processo di ricarica, durato 44 minuti e 45 secondi. Il valore sembra essere plausibile visto che la batteria non era completamente scarica che il valore

nomiale, 5000mAh in questo caso, non è mai realmente tale. Inoltre, anche il tempo di ricarica rispetta quanto dichiarato dal datasheet del caricatore.

Tabella 7 - Definizione temporale degli intervalli di ricarica.

PUNTO	ISTANTE	ORARIO	TENSIONE [V]	delta [S]	nome intervallo
0	0	17:18:47	17,078	00:00:00	\
1	138	17:20:05	17,615	00:01:18	test batteria
2	1242	17:30:32	19,292	00:10:27	iniziale
3	1445	17:31:58	18,8	00:01:26	neg 1
4	1633	17:34:03	19,522	00:02:05	pos 2
5	1877	17:36:24	19,095	00:02:21	neg 2
6	2026	17:37:48	19,811	00:01:24	pos 3
7	2359	17:40:55	19,444	00:03:07	neg 3
8	2490	17:42:04	20,123	00:01:09	pos 4
9	2930	17:46:12	19,794	00:04:08	neg 4
10	3047	17:47:14	20,466	00:01:02	pos 5
11	3608	17:49:34	20,222	00:02:20	neg 5
12	4796	18:03:42	20,555	00:14:08	finale

tempo di carica totale
0:44:55

In Tabella 7, la prima colonna indica la nomenclatura, in base all'ordine crescente, dei punti in cui inizia un periodo; la seconda colonna indica il numero di campione, seguita dalla corrispondente colonna indicante il corrispettivo orario; una colonna indicante la tensione corrispondente, per facilitare la ricerca nel grafico di tale punto attraverso due coordinate; una colonna indicante il valore di tempo tra un punto e il precedente; l'ultima colonna da un'ulteriore nomenclatura in base alle caratteristiche in cui è attualmente il processo di ricarica.

Tabella 8 - Stima della carica.

nome	intervallo di tempo [s]	I1 [A]	I2 [A]	T1 [sample]	T2 [sample]	lav [A]	Qpar [mAh]	Qtot [mAh]
0 1	78	\	\	\	\	5,430	118	118
1 2	627	6,000	9,000	2	12	8,571	1493	1493
2 3	86	2,700	6,000	10	4	3,643	87	1580
3 4	125	6,000	9,000	2	12	8,571	298	1877
4 5	141	2,700	6,000	10	4	3,643	143	2020
5 6	84	6,000	9,000	2	12	8,571	200	2220
6 7	187	2,700	6,000	10	4	3,643	189	2409
7 8	69	6,000	9,000	2	12	8,571	164	2574
8 9	248	2,700	6,000	10	4	3,643	251	2825
9 10	62	6,000	9,000	2	12	8,571	148	2972
10 11	140	2,700	6,000	10	4	3,643	142	3114
11 12	848	\	\	\	\	3,840	905	4018

4.3 Caratterizzazione di alcuni sensori ad effetto Hall

Sono stati valutati e caratterizzati alcuni sensori, tra cui l'ACS758LCB-050B, descritto nel sottoparagrafo 4.3.1. e utilizzato per realizzare il sistema di acquisizione realizzato in questa tesi. Questo sensore è stato scelto in fase sperimentale iniziale, per via dell'incognita sulle correnti in gioco per le correnti; questo sensore, infatti, ha un ampio range di funzionamento e una discreta sensibilità. Come vedremo nel seguito si rivelerà non ottimale per l'applicazione in questione, ma comunque funzionante. Considerazioni riguardo la scelta del sensore ottimale verranno fatte nelle conclusioni.

I sensori verranno tutti testati facendovi scorrere ai terminali P+ e P- una corrente nota detta " I_{input} ", misurata con un amperometro (il "KDM-360CTF" [29]), e misurando la tensione che viene prodotta in uscita dal sensore, detta " V_{out} ", misurata con un voltmetro (il "TENMA 72-10395" [30]). Verranno realizzate delle tabelle per ogni sensore analizzato, le cui colonne verranno composte da corrente nota, tensione in uscita e tensione di alimentazione del sensore con cui è stato eseguito il test.

Lo schema di collegamento, comune a tutti i dispositivi tesati, è mostrato qui di seguito in Figura 54, mentre la foto del setup è mostrata in Figura 55. L'unica differenza nell'esecuzione dei test è che un sensore è bidirezionale; quindi, la corrente I_{input} verrà fatta scorrere in entrambi i sensi invece che in uno solo.

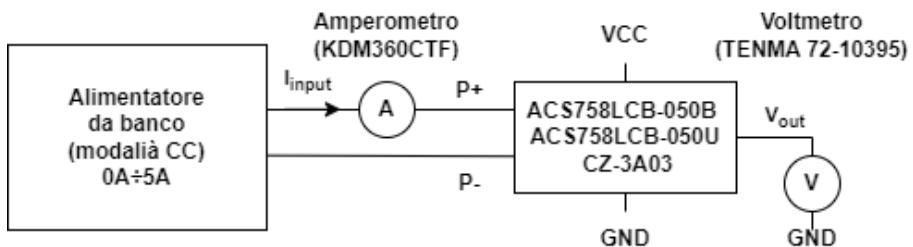


Figura 54 – Schema di collegamento, comune a tutti i sensori sotto test.

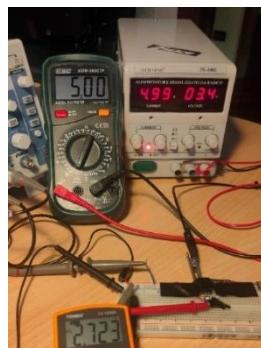


Figura 55 - Setup sperimentale per la caratterizzazione dei sensori.

Fonte: produzione propria

4.3.1 ACS758LCB-050B

Leggendo il datasheet [19] del sensore ACS758LCB-050B, prodotto da Allegro Microsystems [18], questo dispositivo appartiene alla famiglia di sensori che offre soluzioni economiche e precise per il rilevamento della corrente AC o DC. Le applicazioni tipiche di questi sensori comprendono il controllo dei motori, il rilevamento del carico, il controllo dell'alimentazione e dei convertitori DC-DC, controllo di inverter e rilevamento di guasti da sovraccorrente. Il sensore è costituito da un circuito lineare di Hall di precisione, a basso offset con un percorso di conduzione in rame situato vicino al circuito di rilevamento.

La corrente applicata che scorre attraverso questo percorso di conduzione in rame, con resistenza da soli $100 \mu\Omega$, genera un campo magnetico che il circuito di Hall converte in una tensione proporzionale alla sua intensità. Lo spessore di questo conduttore permette la sopravvivenza del dispositivo da condizioni di sovraccorrente di circa 1200A.

Il sensore può essere alimentato da 3V a 5,5V, ha un tempo di risposta a un gradino di corrente di 3 μs ed è disponibile in vari package, in varie portate di corrente, di tipo bidirezionali o unidirezionali, mostrati insieme al generico pinout in Figura 56.

L'ACS758LCB-050B in particolare ha package PFF, è bidirezionale, può misurare correnti che vanno da -50A a 50A, ha una sensibilità dichiarata di 40mV/A e consuma 10mA, cosa che al momento tolleriamo, ma che in un'applicazione ottimizzata al risparmio energetico potrebbe creare problemi. Presenta un rumore di 10 mV dichiarato, e varie tipologie di errori elencate e descritte in dettaglio sul datasheet.

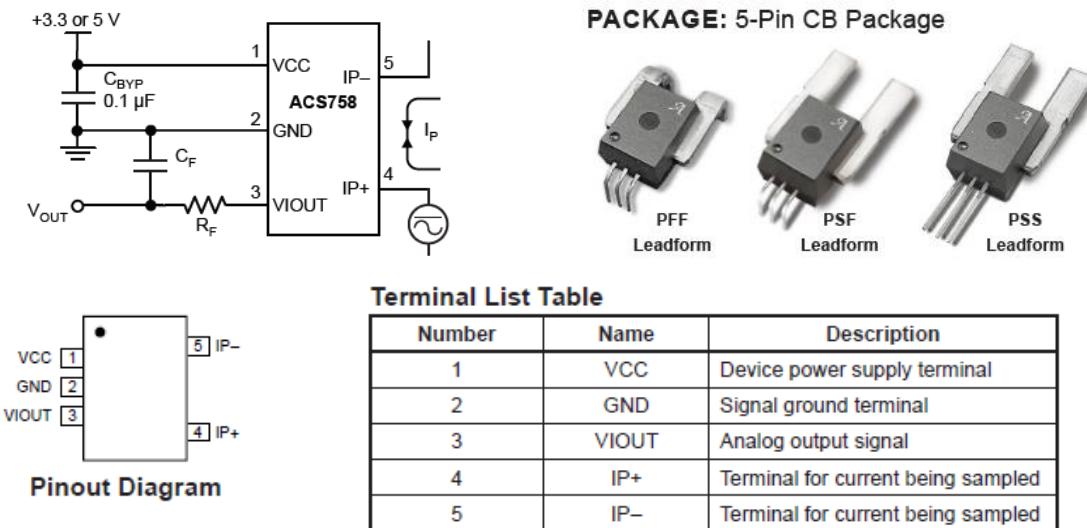


Figura 56 - Package vari, Pinout generale, e applicazione tipica.

Fonte: Datasheet ACS758

La sua caratteristica di uscita è rappresentata nel grafico di Figura 57. Quando nel sensore non passa corrente la tensione è portata a $V_{CC}/2$; questo fatto vedremo che risulterà un problema, nel paragrafo 4.3, perché i valori caratteristici del sensore sono dichiarati a 5V, mentre noi lo useremo a 3,3V.

Per caratterizzare sperimentalmente questo sensore è stato montato su breadboard ed alimentato prima a 5V e poi a 3,3V. Per entrambe le alimentazioni sono stati forniti dei valori di corrente in ingresso al sensore, grazie ad un alimentatore da banco in grado di fornire 5A, utilizzando un range da -5A a 5A con passo 0,5A, girandolo a metà operazione. I risultati sperimentali sono stati riportati in Figura 58 e in Figura 59. Possiamo notare che alimentando il sensore a 3,3V, la sensibilità, ovvero il coefficiente angolare della retta interpolante i punti sperimentali, si riduca.

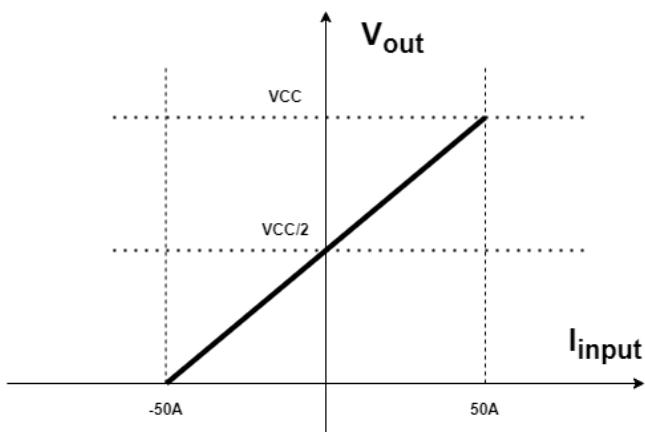


Figura 57 - Caratteristica ideale del sensore ACS758LCB-050B.

Fonte: produzione propria

I input [A]	Vout[V]	Vcc [V]
-5,00	2,326	5,04
-4,50	2,349	5,04
-4,00	2,370	5,04
-3,50	2,390	5,04
-3,00	2,406	5,04
-2,50	2,426	5,04
-2,00	2,446	5,04
-1,50	2,466	5,04
-1,00	2,484	5,04
-0,50	2,504	5,04
0,00	2,528	5,04
0,50	2,546	5,04
1,00	2,565	5,04
1,50	2,584	5,04
2,00	2,604	5,04
2,50	2,623	5,04
3,00	2,643	5,04
3,50	2,663	5,04
4,00	2,682	5,04
4,50	2,703	5,04
5,00	2,723	5,04

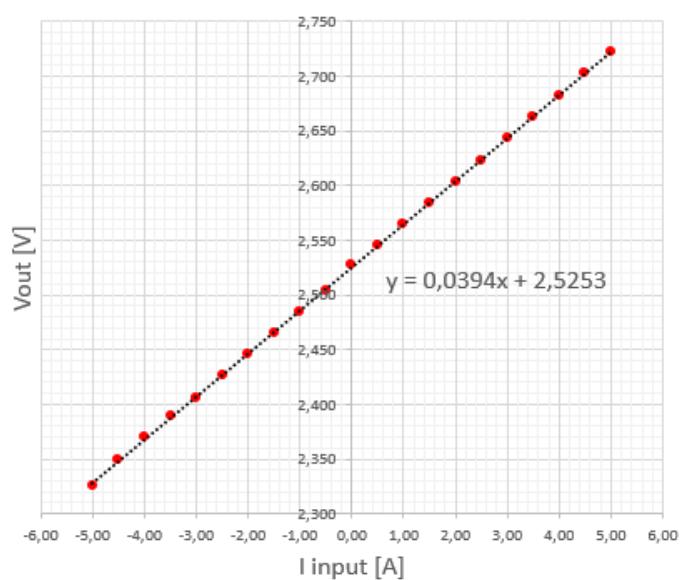


Figura 58 - Caratteristica sperimentale del sensore ACS758LCB-050B alimentato a $V_{CC}=5V$.

Fonte: produzione propria

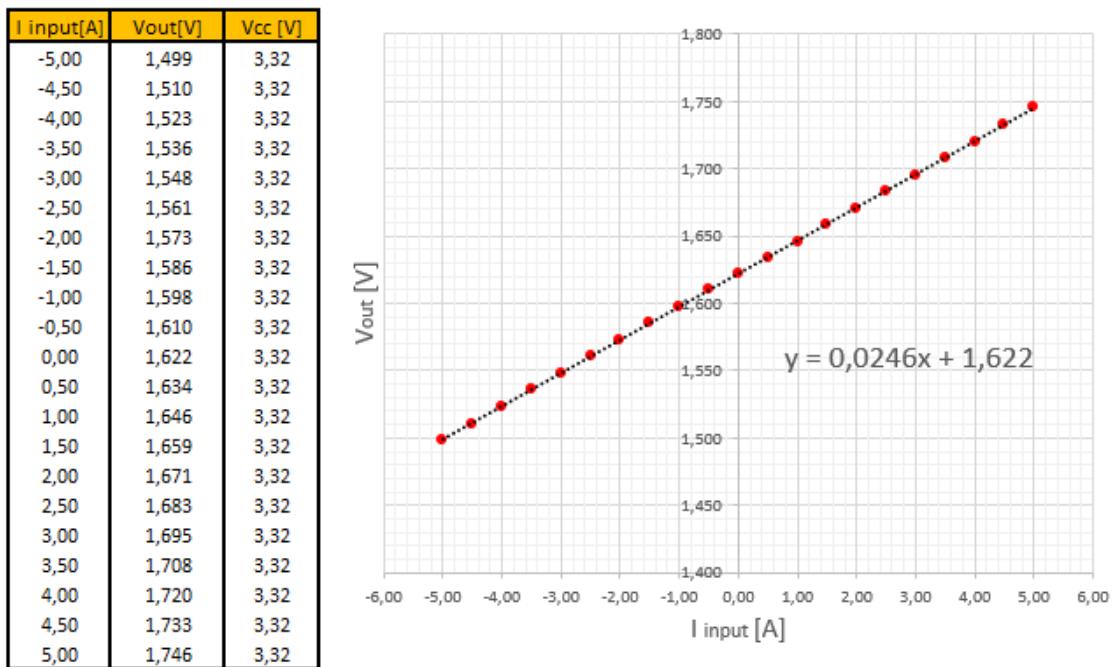


Figura 59 - Caratteristica sperimentale del sensore ACS758LCB-050B alimentato a VCC=3,3V.

Fonte: produzione propria

4.3.2 ACS758LCB-050U

Il datasheet di questo sensore è lo stesso del sensore precedente.

L'ACS758LCB-050U è un sensore di Hall unidirezionale. Misura la corrente da 0A a 50A; ha una sensibilità di 60mV/A. Quando nel sensore non passa corrente la tensione è a 0,6V. Presenta un rumore di 15 mV dichiarato, e varie tipologie di errori elencate e descritte in dettaglio sul datasheet. La caratteristica ideale viene riportata in Figura 60, mentre i risultati sperimentali sono stati riportati in Figura 61 e in Figura 62.

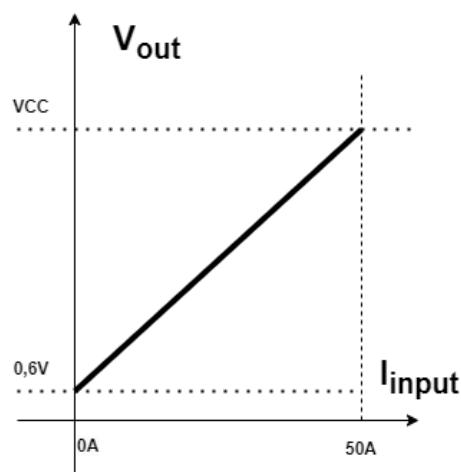


Figura 60 - Caratteristica ideale del sensore ACS758LCB-050U.

Fonte: produzione propria

I input [A]	Vout [V]	Vcc [V]
0,00	0,608	5,04
0,50	0,638	5,04
1,00	0,669	5,04
1,50	0,700	5,04
2,00	0,730	5,04
2,50	0,760	5,04
3,00	0,790	5,04
3,50	0,821	5,04
4,00	0,852	5,04
4,50	0,883	5,04
5,00	0,914	5,04

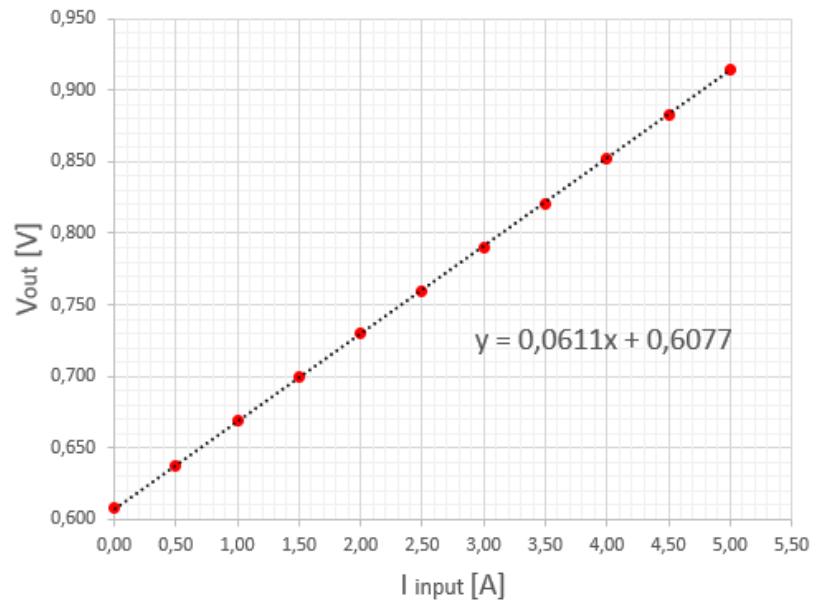


Figura 61 - Caratteristica sperimentale del sensore ACS758LCB-050U alimentato a VCC=5V.

Fonte: produzione propria

I input [A]	Vout [V]	Vcc [V]
0,00	0,395	3,32
0,50	0,413	3,32
1,00	0,432	3,32
1,50	0,451	3,32
2,00	0,470	3,32
2,50	0,490	3,32
3,00	0,508	3,32
3,50	0,526	3,32
4,00	0,545	3,32
4,50	0,564	3,32
5,00	0,583	3,32

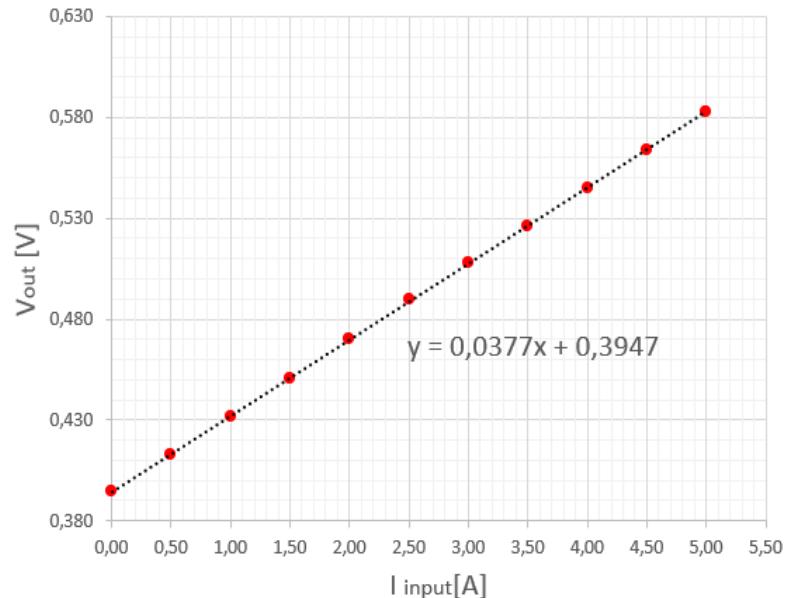


Figura 62 - Caratteristica sperimentale del sensore ACS758LCB-050U alimentato a VCC=3,3V.

Fonte: produzione propria

Analogamente alla versione del sensore bidirezionale, alimentandolo a 3,3V la sensibilità diminuisce.

4.3.3 CZ-3A03

Dal datasheet [32], il CZ-3A03 è un sensore di Hall bidirezionale, funzionante con un'alimentazione nativa di 3,3V. I suoi tipici campi di impiego sono in driver AC, motori DC, UPS, inverter, regolatori di potenza. Inoltre, è adatto ad applicazioni che richiedono isolamento, piccole dimensioni e soppressione della generazione di calore. Anche questo dispositivo ha un conduttore primario per far scorrere la corrente da misurare, la quale genera un campo magnetico rilevato dal circuito interno di Hall. La caratteristica tipica dell'uscita e il pinout sono mostrati in Figura 63.

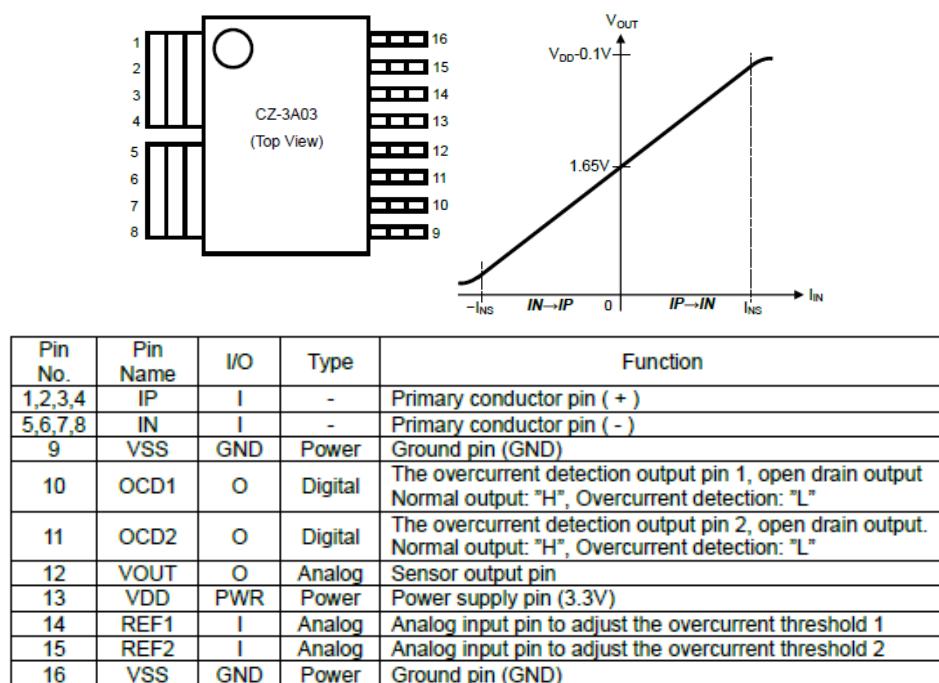


Figura 63 - Pinout e caratteristica tipica dell'uscita del sensore CZ-3A03.

Fonte: Datasheet CZ-3A03

Avendo un package SMD è stato realizzato un adattatore per breadboard, mostrato in Figura 64.

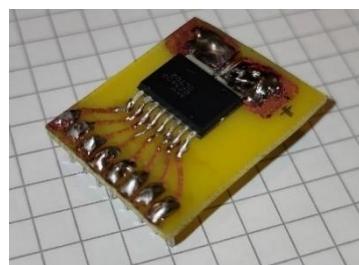


Figura 64 - Adattatore del sensore per il montaggio su breadboard.

Fonte: produzione propria

Questo dispositivo ha inoltre due pin analogici per poter regolare le soglie (REF1 e REF2) di sovraccorrente da rilevare. Quando la corrente supera una delle due soglie

viene attivato il pin di uscita corrispondente (OCD1 o OCD2) alla soglia che è stata superata. Può essere molto utile in applicazioni critiche o per rilevare cortocircuiti e salvare l'integrità del dispositivo su cui il sensore è montato. Un'applicazione tipica è mostrata in Figura 65.

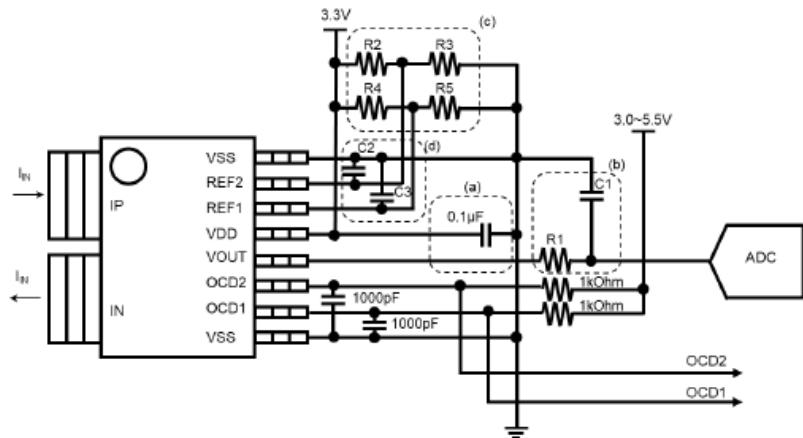


Figura 65 - Applicazione tipica del sensore, con rilevamento di sovraccorrenti.

Fonte: Datasheet CZ-3A03

Dal datasheet venivano dichiarati 70mV/A, il cui valore sperimentale, come si vede dal grafico in Figura 66 è molto simile.

I input[A]	Vout[V]	Vcc [V]
-5,00	1,295	3,32
-4,50	1,330	3,32
-4,00	1,365	3,32
-3,50	1,399	3,32
-3,00	1,435	3,32
-2,50	1,469	3,32
-2,00	1,503	3,32
-1,50	1,539	3,32
-1,00	1,574	3,32
-0,50	1,609	3,32
0,00	1,644	3,32
0,50	1,680	3,32
1,00	1,714	3,32
1,50	1,750	3,32
2,00	1,784	3,32
2,50	1,819	3,32
3,00	1,853	3,32
3,50	1,888	3,32
4,00	1,922	3,32
4,50	1,957	3,32
5,00	1,992	3,32

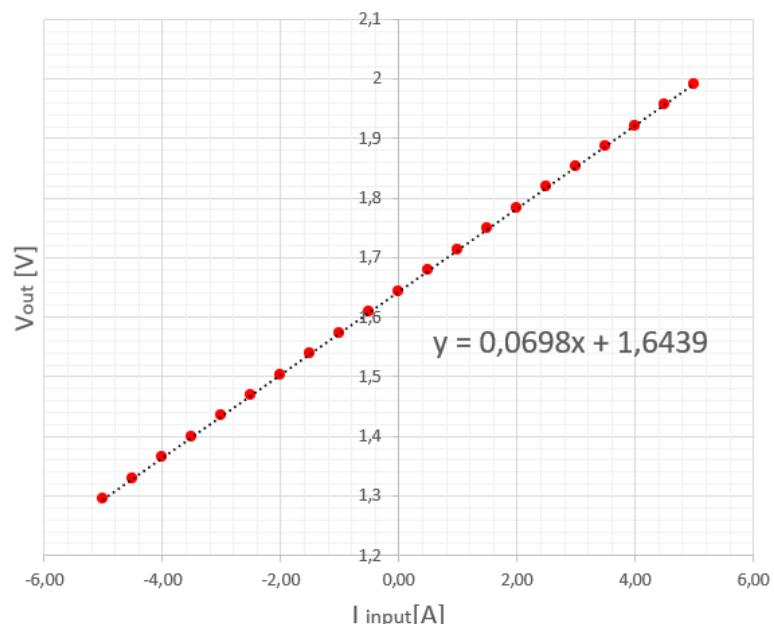


Figura 66 - Punti sperimentali e linearizzazione dell'uscita del sensore CZ-3A03.

Fonte: produzione propria

4.4 Verifica dei firmware in C

Grazie all'IDE è stato possibile utilizzare il debugger per vedere il corretto riempimento degli array con le misure acquisite ed il successivo calcolo del valore medio, come mostrato in Figura 67. Inoltre, grazie al monitor seriale sono stati osservati i valori mediati, prima di inviarli al software in Python.

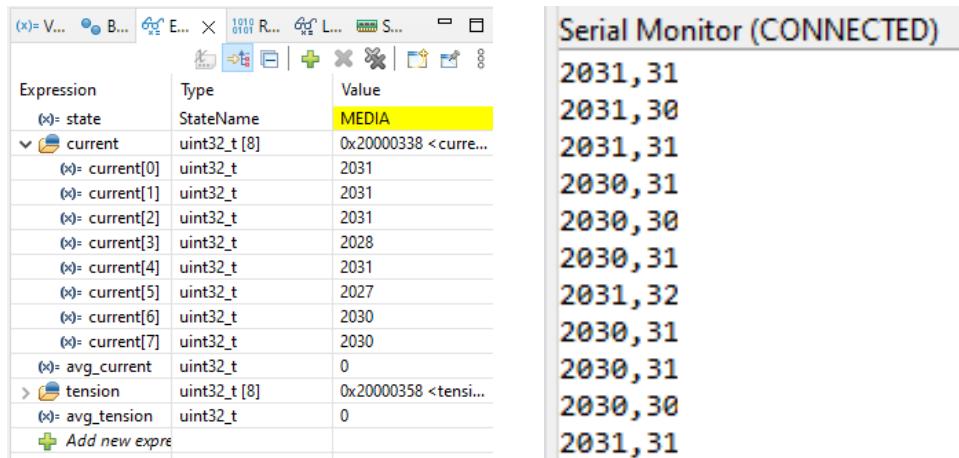


Figura 67 - Debug del firmware.

Fonte: produzione propria (screenshot del software IDE)

Per verificare il corretto timing dell'ADC, è stato utilizzato l'analizzatore logico [26] collegato tra la Nucleo board e il PC. Lo schema di principio dei collegamenti è mostrato in Figura 68.

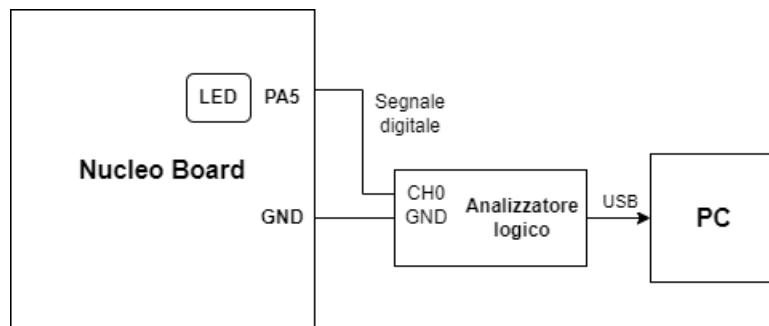


Figura 68 – Schema di principio dei collegamenti per la verifica del timing dell'ADC.

Fonte: produzione propria

Nel firmware sono stati inserite appositamente delle righe di codice per accendere il led presente sulla scheda nucleo quando inizia la conversione di un canale e spegnerlo quando essa finisce, per poi ripetere l'operazione ogni volta che avviene una singola

conversione; Il led è collegato a sua volta al pin PA5 del connettore sulla scheda, al quale è stato collegata una sonda dell'analizzatore.

In Figura 69 si vedono le misure mediate, distanti Delay2, di circa 490 ms tra una misura mediata e la successiva; in Figura 70 si vedono le N misure (in questo caso 8) che andranno a comporre la misura mediata, delle quali N-1 sono distanziate dal Delay1 di 864 μ s; in Figura 71 si vede la coppia di conversioni corrispondenti ai canali riguardanti la misura di corrente e poi di tensione e la distanza tra esse.

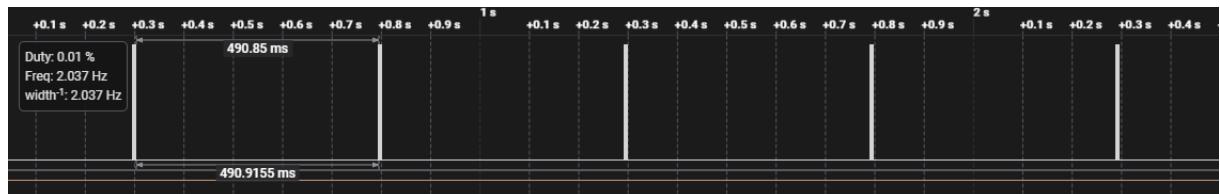


Figura 69 - Misure medicate ogni $T_c=0,5\text{s}$.

Fonte: produzione propria (screenshot analizzatore logico)

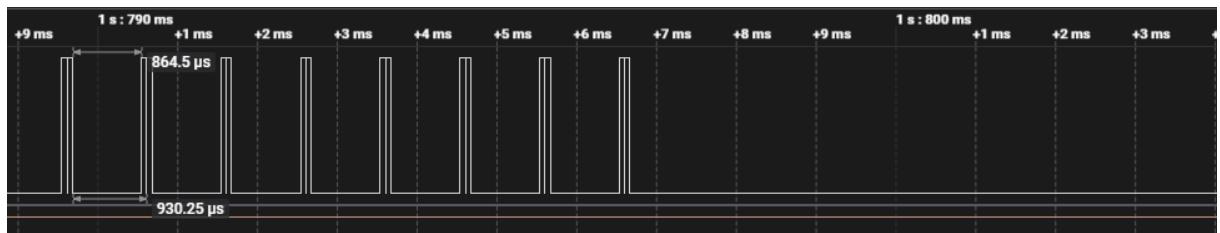


Figura 70 - Singola misura mediata composta da N misure.

Fonte: produzione propria (screenshot analizzatore logico)

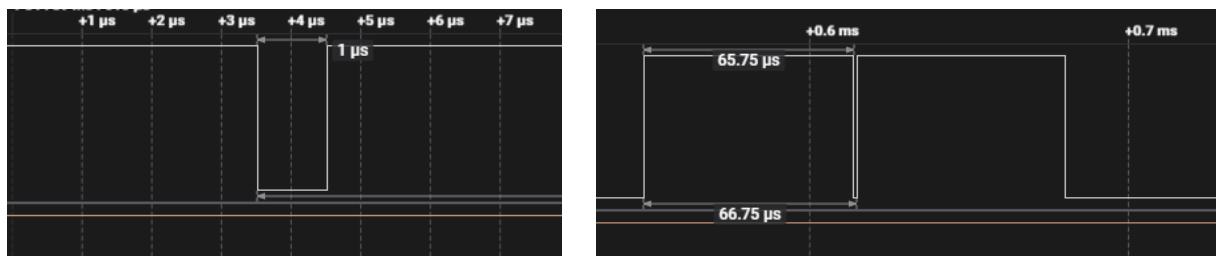


Figura 71 - Singola misura composta dalla coppia di conversioni dei due canali analogici, a sinistra; distanza temporale tra le due conversioni della misura, a destra.

Fonte: produzione propria (screenshot analizzatore logico)

4.5 Carico elettronico programmabile

4.5.1 Il carico elettronico Keysight N3300A

Per poter eseguire i test di scarica della batteria è stato utilizzato il carico programmabile Keysight N3300A [31], presente nel laboratorio eLUX [32], mostrato in Figura 72.



Figura 72 - Carico programmabile Keysight N3300A, fronte a sinistra, retro a destra.

Fonte: Keysight, N3300 Series Modular DC Electronic Load, <https://www.keysight.com/us/en/products/dc-electronic-loads/n3300-series-modular-dc-electronic-loads.html>

In generale, i carichi programmabili sono strumenti da laboratorio elettronici in grado di dissipare potenza secondo profili di tensione e corrente desiderati, per poter testare batterie, alimentatori, pannelli fotovoltaici e qualsiasi altro dispositivo in grado di generare potenza elettrica, per maggiori dettagli su principi di funzionamento, si rimanda a [33] .

Questo carico presenta un pannello di comando frontale, che permette di eseguire manualmente tutti i comandi a disposizione, mentre per il controllo via remoto, ed il log di dati, viene eseguito tramite collegamento a interfaccia GPIB o seriale RS232, utilizzando istruzioni dello standard SCPI [34] (tutti i comandi manuali sono eseguibili da remoto).

Essendo uno strumento modulare, sul retro è possibile installare uno o più moduli con caratteristiche diverse a seconda delle specifiche. Sul carico è presente il modulo N3305A, capace di dissipare 500W di potenza massimi, con un range di corrente che va da 0 a 60A, e con un range di tensione che va da 0 a 150V. Per ulteriori informazioni si rimanda al datasheet del produttore [31].

Il carico può assorbire potenza in tre modi: a corrente costante, a tensione costante e a potenza costante, modalità precedentemente descritte nel paragrafo 2.12.1. Noi utilizzeremo la modalità a corrente costante.

È possibile attivare o disabilitare l'input dello strumento, per decidere quando far partire il processo di scarica. Inoltre, fornisce la possibilità di eseguire le misurazioni della tensione ai suoi capi e della corrente che sta assorbendo, le quali possono essere trasmesse a un dispositivo esterno (nel nostro caso un computer), il quale le utilizzerà per monitorare il processo di scarica e prendere decisioni operative basandosi su questi dati ricevuti. Per maggiori dettagli si rimanda a [35].

La batteria verrà collegata agli appositi terminali di input del carico. Bisogna tenere presente che, viste le correnti elevate che entreranno in gioco, la resistenza dei cavi di collegamento non sarà trascurabile. Infatti, quando la corrente vi scorre attraverso si genera una differenza di potenziale, secondo la legge di ohm, la quale è direttamente proporzionale alla corrente. Questa è fastidiosa, perché le misure di tensione che effettua il carico sono relative ai capi dei suoi terminali, mentre ai capi della batteria vi sarà una differenza di potenziale diversa. Per monitorare quest'ultima bisogna quindi utilizzare un multimetro esterno. Si è scelto di utilizzare il multimetro digitale Agilent N34411A [27], mostrato in Figura 73, il quale permette a sua volta il log dei dati utilizzando SCPI. Il tutto verrà gestito da un software scritto in Python, eseguito su PC.



Figura 73 - Multimetro digitale Agilent 34411A.

Fonte: Leasametric, 34411A KEYSIGHT / AGILENT, <https://www.leasametric.com/en/product/keysight-agilent-34411a/>

4.5.2 Programma in Python per il comando e l'acquisizione dati

Per poter raccogliere i valori di tensione e di corrente nel tempo è stato necessario sviluppare un software in Python da usare su computer, che comunicasse con il carico elettronico, con il multimetero digitale da banco, con il sistema di acquisizione sviluppato con il micro stm32 e che loggasse i dati in un file Excel, per poterli successivamente rielaborare. Si è scelto di programmare ad oggetti, in modo da favorire l'astrazione e la riusabilità del codice per possibili modifiche e applicazioni future.



Figura 74 - Loghi di Python ed Excel (a sinistra e a destra rispettivamente).

Fonte: a) Icon Icons, <https://icon-icons.com/it/icona/python-verticale-logo/168039>
b) Vecteezy, <https://it.vecteezy.com/arte-vettoriale/19550761-microsoft-eccellere-logo-icona-vettore-gratuito-scarica>

Il programma principale è scritto nel file “**Electronic_load_N3300A_main.py**”, la sua implementazione non è riportata integralmente in questa tesi, perché lungo e complesso, ma ne viene fornita una descrizione funzionale complessiva e alcune indicazioni per utilizzarlo. Le classi implementate, raggruppate nel package “**Keysight_N3300A_py_modules**” sono:

- “**ELN3300ASerial**”, per la gestione della comunicazione tra il carico elettronico e il computer, basata su seriale RS232. Manda comandi al carico e riceve i valori di tensione e di corrente misurati dallo stesso;
- “**Agilent34411A**”, per la gestione della comunicazione tra multimetero digitale e il computer, implementata tramite Telnet con cavo Ethernet;
- “**Stm32Serial**”, che si occupa della gestione della comunicazione tra sistema di acquisizione basato su stm32 e il computer, tramite seriale USART. Riceve e separa la coppia di valori dei registri ADC, rappresentanti tensione e corrente misurata dal sistema;
- “**ELN3300ACommands**”, per la creazione di comandi formattati da inviare al carico, traducendo i grezzi comandi SCPI forniti dal produttore [36]. Fornisce un metodo per formattare le stringhe in ricezione dal carico in modo da poterle utilizzare per altri scopi, quali l'acquisizione dei valori di corrente e di tensione forniti dal carico.
- La classe “**ExcelDataLogger**”, per inserire e salvare i dati in un foglio Excel, nel formato corretto, in modo da poterli riutilizzare.

Nel main vengono importati i package e le librerie necessarie. Successivamente vengono istanziati gli oggetti appena citati. Viene poi implementato il menu per eseguire delle azioni, inserito in un ciclo while in modo da permetterne o meno il compimento di ulteriori. Il menu è realizzato con uno switch case, nel quale ciascun caso rimanda a una funzione specifica, la quale implementa la funzionalità desiderata.

Le voci del menu sono le seguenti:

- “**1**” - Invia manualmente comandi SCPI al carico elettronico, tramite terminale;
- “**2**” - Imposta il carico in modalità corrente costante, inserendone numericamente l'intensità. Viene eseguito in automatico il log dei dati dello stesso e del sistema di acquisizione con stm32, su Excel;
- “**3**” - Imposta il carico in modalità corrente costante, inserendone numericamente l'intensità. Viene eseguito in automatico il log dei dati dello stesso, del sistema di acquisizione con stm32, e del multmetro digitale, su Excel;
- “**4**” - Esegui il log dei dati provenienti dal sistema di acquisizione con stm32, su Excel;
- “**5**” - Esegui il log dei dati provenienti dal sistema di acquisizione con stm32, su Excel;
- “**q**” - Esci e chiudi il programma.

Per selezionare l'azione da intraprendere basta digitare il numero (o il carattere minuscolo) e premere invio.

Per avviare il programma basta premere “doppio click” sull'icona del file Python, operando in ambiente Windows, con Python installato.

All'avvio viene aperta una console di comando, e viene comunicata la buona o cattiva riuscita della connessione con i dispositivi del progetto, per poi mostrare un menu di scelta con elencate le azioni da intraprendere. Viene riportato in Figura 75 il diagramma di flusso del programma e successivamente, in Figura 76 la schermata di quanto viene visualizzato da utente.

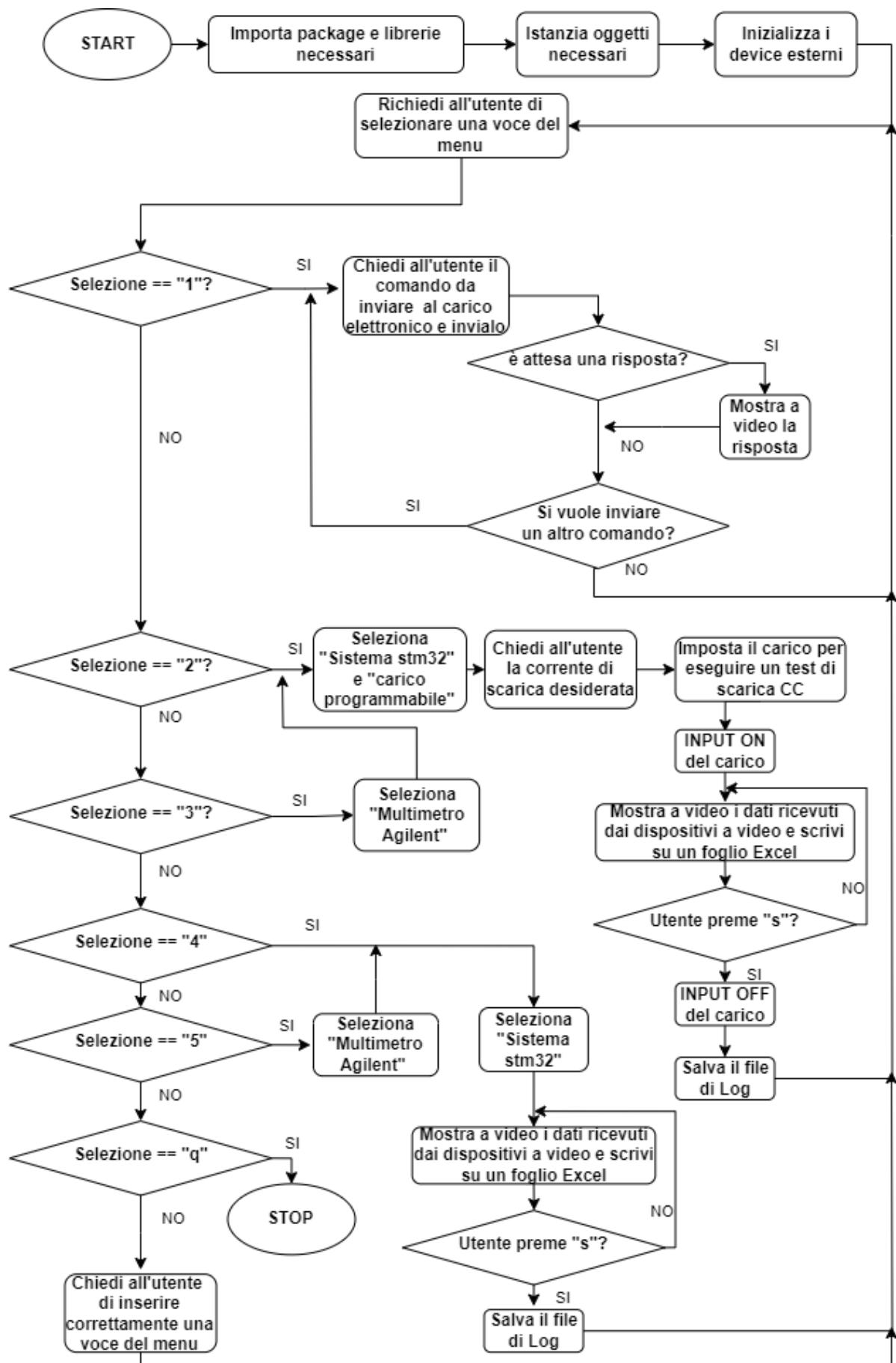


Figura 75 – Diagramma di flusso semplificato del programma in Python.

Fonte: produzione propria

```

Electronic load N3300A software - version 1.5 - August 2023
by Molari Stefano
-----
trying to connect to the electronic load and the stm32..
trying connection with the multimeter..
multimeter connected on 169.254.4.10 !
configurating the multimeter..
stm32 connected on COM5!
load connected on COM6!
Device info: Agilent Technologies,N3300A,0,A.00.08

ELOAD INPUT OFF!!

MENU
-----
-press "1" to send commands manually to the eLoad
-press "2" to use: eLoad (CC mode) + stm32 + EXCEL logger
-press "3" to use: eLoad (CC mode) + stm32 + DM + EXCEL logger
-press "4" to use: stm32 + Excel logger
-press "5" to use: stm32 + DM +Excel logger
-press "q" to exit and close the program

```

Figura 76 - Terminale di interfaccia del programma in Python.

Fonte: produzione propria

Un file di log dei dati verrà salvato nella stessa cartella contenente il file “main.py” ogni volta che viene completata un’azione del menu. Questo file avrà la data e l’ora esatta di creazione, e una volta aperto apparirà come in Figura 77, con colonne riempite o meno a seconda degli strumenti collegati.

Il foglio Excel avrà come prima colonna il numero di misurazione, per tener traccia del numero di campioni acquisiti; come seconda colonna l’istante temporale di misurazione; due colonne per i dati di tensione e di corrente misurati dal carico elettronico; due colonne contenenti i valori dei registri dell’ADC, corrispondenti ai due canali del sistema di acquisizione; due colonne con i calori di tensione e corrente convertiti grazie alle rette di calibrazione ottenute nel paragrafo 4.6; una colonna contenente i valori ricevuti dal multmetro.

s_num	time	Eload_I [A]	Eload_V [V]	CH0	CH1	sys_I [A]	sys_V [V]	mult_tension [V]
1	09-29-2023_13-01-23	5,01297	17,239	2174	3634	5,04553	19,80692	19,7890526
2	09-29-2023_13-01-24	5,013	17,2359	2172	3632	4,981001	19,79601	19,784679
3	09-29-2023_13-01-24	5,01306	17,2331	2173	3631	5,013266	19,79056	19,7803219
4	09-29-2023_13-01-25	5,01303	17,2302	2171	3630	4,948737	19,7851	19,7742356
5	09-29-2023_13-01-25	5,01318	17,2273	2172	3629	4,981001	19,77965	19,7683431
6	09-29-2023_13-01-26	5,01298	17,2231	2173	3628	5,013266	19,77419	19,7630842
7	09-29-2023_13-01-26	5,0129	17,2165	2172	3627	4,981001	19,76874	19,7579555

Figura 77 - Prime righe del foglio Excel contenente i dati salvati.

Fonte: produzione propria

4.6 Caratterizzazione del sistema di acquisizione

Il sistema di acquisizione è stato testato sia per la misura di corrente che per quella di tensione.

Per quanto riguarda la caratterizzazione della misura di **corrente**, è stato utilizzato un alimentatore da banco regolabile in grado di generare una corrente continua da 0A a 10A. Il range di corrente di test, dunque, va da -10A a 10A (invertendo a metà processo il verso della corrente), con un passo di 1A tra un valore noto di corrente e il successivo. Per ogni singolo valore noto sono stati acquisiti 50 campioni, così da poterli mediare post acquisizione riducendo l'incertezza. Utilizzando il software in Python è stato monitorato il valore dell'ADC corrispondente a IN1, il livello di tensione in uscita dal sensore di corrente (sul pin 3), utilizzando il multimetro digitale Agilent 34411A [27], sono stati salvati anche i corrispettivi valori indicati dal sistema di acquisizione, per poi confrontarli. Per quanto riguarda la caratterizzazione della misura di **tensione**, è stato utilizzato un alimentatore da banco lineare, il quale presenta meno rumore rispetto all'altro utilizzato per la corrente (in quanto era switching). Il range della tensione di test va da 0V a 22V, con passo 1V tra un valore noto di tensione e il successivo. Per ogni singolo valore noto sono stati acquisiti 30 campioni, così da poterli mediare post acquisizione riducendo l'incertezza.

In Figura 78 viene mostrato lo schema del setup sperimentale, costituito dal sistema da caratterizzare, dal PC per eseguire il data logger in Python, da un amperometro palmare per misurare le correnti note immesse nel sistema, da un multimetro per misurare le tensioni note immesse nel sistema, dal multimetro Agilent per il log dei valori in uscita prima dal sensore di corrente e poi dal blocco di misura della tensione del sistema. In Figura 79 viene mostrata la foto del setup.

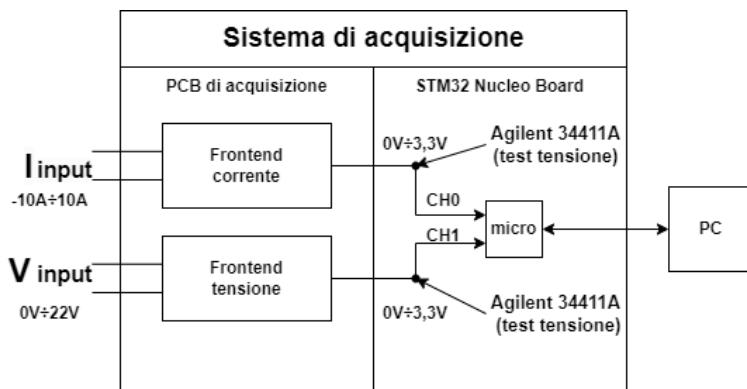


Figura 78 - Schema concettuale del setup sperimentale per la caratterizzazione del sistema di acquisizione.

Fonte: produzione propria

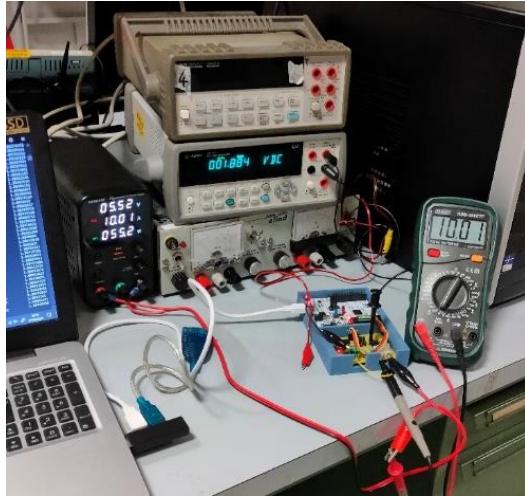


Figura 79 - Setup sperimentale per la caratterizzazione del sistema di acquisizione.

Fonte: produzione propria

Sono state create due cartelle di lavoro Excel, una per l'analisi dell'acquisizione della corrente e un'altra per la tensione. In queste sono stati inseriti tutti i campioni raccolti dalla seriale della Nucleo Board e dal multimetro da banco Agilent, calcolandone poi medie, varianze, errori per andare a comporre due ulteriori fogli di calcolo.

Le colonne dei fogli relativi ai valori di corrente, posti in ingresso al frontend di corrente del sistema (alcune righe di uno di questi, mostrate in Figura 80) corrispondono a:

- “ADC out ideale”: il valore che ci si aspetta in uscita dall’ADC, ponendo in ingresso la “I input [A]”, ottenuto moltiplicando “Vout sensore ideale [V]” per “ADC_full_scale []” e dividendo per “Vref [V]”;
- “ADC out”: il valore del registro dell’ADC, dedicato per il frontend di corrente, inviato dal microcontrollore via seriale;
- “Errore ADC”: differenza di “ADC out” e “ADC out ideale”;
- “Errore ADC [V]”: differenza di “ADC out” e “ADC out ideale”, espresso in volt ;
- “Vout sensore ideale [V]”: valore in uscita, secondo la caratteristica ideale del sensore ACS758-050B, ponendo in ingresso “I input [A]”;
- “Vout sensore [V]”: valore in uscita dal sensore ACS758-050B e misurato con il multimetro Agilent;
- “Errore Vout sensore [V]” la differenza tra “Vout sensore [V]” e “Vout sensore ideale [V]”;
- “I input [A]”: la corrente in ingresso al frontend di corrente;
- “I lin [A]”: corrente linearizzata, calcolata utilizzando coefficiente angolare e intercetta della retta approssimante ottenuta post caratterizzazione (mostrati poi);

- “Errore I input[A]”: differenza tra “I lin [A]” e “I input [A]”;
- “Vref [V]”: tensione di riferimento dell’ADC utilizzata;
- “ADC_bit”: bit dell’ADC del microcontrollore utilizzato;
- “V/count [V]”: volt per singolo count dell’ADC;
- “A/count [A]”: ampère per singolo count dell’ADC;
- “max_I [A]”: portata massima del sensore ACS758-050B;
- “min_I [A]”: portata minima del sensore ACS758-050B.

	ADC out ideale	ADC out	Errore ADC	Errore ADC [V]	Vout sensore Ideale [V]	Vout sensore [V]	Errore Vout sensore [V]	I input [A]	I lin [A]	Errore I input[A]		I input [A]	10
2457	2327	-130	-0,10476	1,98	1,88540	-0,09460	10,00000	9,98197	-0,01803				
2457	2329	-128	-0,10315	1,98	1,88541	-0,09459	10,00000	10,04650	0,04650		Vref [V]	3,3	
2457	2331	-126	-0,10154	1,98	1,88547	-0,09453	10,00000	10,11103	0,11103		ADC_bit	12	
2457	2326	-131	-0,10557	1,98	1,88551	-0,09449	10,00000	9,94971	-0,05029		ADC_full_scale []	4095	
2457	2328	-129	-0,10396	1,98	1,88544	-0,09456	10,00000	10,01424	0,01424		V/count [V]	0,000806	
2457	2329	-128	-0,10315	1,98	1,88542	-0,09458	10,00000	10,04650	0,04650		A/count [V]	0,02442	
2457	2331	-126	-0,10154	1,98	1,88550	-0,09450	10,00000	10,11103	0,11103		max_I [A]	50	
2457	2327	-130	-0,10476	1,98	1,88545	-0,09455	10,00000	9,98197	-0,01803		min_I [A]	-50	

Figura 80 - Prime righe di un foglio corrispettivo a un valore di corrente in ingresso al sistema.

Fonte: produzione propria

Le colonne dei fogli relativi ai valori di tensione, posti in ingresso al frontend di tensione del sistema (alcune righe di uno di questi, mostrate in Figura 81) corrispondono a:

- “ADC out ideale”: il valore che ci si aspetta in uscita dall’ADC, ponendo in ingresso la “V input [V]”, ottenuto moltiplicando “Vout frontend ideale [V]” per “ADC_full_scale []” e dividendo per “Vref [V]”;
- “ADC out”: il valore del registro dell’ADC, dedicato per il frontend di tensione, inviato dal microcontrollore via seriale;
- “Errore ADC”: differenza di “ADC out” e “ADC out ideale”;
- “Errore ADC [V]”: differenza di “ADC out” e “ADC out ideale”, espresso in volt ;
- “Vout frontend ideale [V]”: valore in uscita, secondo la caratteristica ideale del frontend di tensione, ponendo in ingresso “V input [V]”;
- “Vout frontend [V]”: valore in uscita dal frontend di tensione e misurato con il multimetro Agilent;
- “Errore Vout frontend [V]” la differenza tra “Vout frontend [V]” e “Vout frontend ideale [V]”;
- “V input [V]”: la tensione in ingresso al frontend di tensione;
- “V lin [V]”: tensione linearizzata, calcolata utilizzando coefficiente angolare e intercetta della retta approssimante ottenuta post caratterizzazione (mostrati poi);

- “Errore V input[V]”: differenza tra “V lin [V]” e “V input [V]”;
- “Vref [V]”: tensione di riferimento dell’ADC utilizzata;
- “ADC_bit”: bit dell’ADC del microcontrollore utilizzato;
- “V/count [V]”: volt per singolo count dell’ADC;
- “max_V [V]”: portata massima del frontend di tensione;
- “min_V [V]”: portata minima del frontend di tensione;

	ADC out ideale	ADC out	Errore ADC	Errore ADC [V]	Vout frontend Ideale [V]	Vout frontend [V]	Errore Vout frontend [V]	V input [V]	V lin [V]	Errore V input[V]	
	4095	4035	-60	-0,04835	3,3	3,269407	-0,03059	22,00000	21,99442	-0,00558	V input [V]
	4095	4035	-60	-0,04835	3,3	3,26935	-0,03065	22,00000	21,99442	-0,00558	Vref [V]
	4095	4035	-60	-0,04835	3,3	3,269349	-0,03065	22,00000	21,99442	-0,00558	ADC_bit
	4095	4035	-60	-0,04835	3,3	3,269354	-0,03065	22,00000	21,99442	-0,00558	ADC_full_scale []
	4095	4035	-60	-0,04835	3,3	3,269473	-0,03053	22,00000	21,99442	-0,00558	V/count
	4095	4038	-57	-0,04593	3,3	3,269258	-0,03074	22,00000	22,01079	0,01079	V(op-amp)/count
	4095	4036	-59	-0,04755	3,3	3,269331	-0,03067	22,00000	21,99988	-0,00012	max_V [V]
	4095	4035	-60	-0,04835	3,3	3,269307	-0,03069	22,00000	21,99442	-0,00558	min_V[V]

Figura 81 - Prime righe di un foglio corrispettivo a un valore di tensione in ingresso al sistema.

Fonte: produzione propria

Grazie alla rielaborazione di questi dati, è stato possibile ricavare i punti mediati delle caratteristiche di tensione e di corrente del sistema di acquisizione, con i quali sono state ricavate le rette interpolanti, usando il metodo dei minimi quadrati, i cui coefficienti sono stati usati nel software in Python per calcolare il valore della tensione e della corrente misurati, partendo dal dato grezzo dei registri dell’ADC. Viene mostrata in Figura 82 la tabella e il grafico relativi alla corrente, mentre in Figura 83 la tabella e il grafico relativi alla tensione. I coefficienti relativi alla tensione sono molto simili a quelli ideali, mentre quelli relativi alla corrente vi è un’intercetta minore.

Bisogna tener presente che il sistema è stato linearizzato in un range di corrente da -10A e 10A, e in un range di tensione da 0V a 22V; per sfruttare al massimo il sensore montato in questo sistema si potrebbe pensare di ripetere la procedura di linearizzazione appena descritta ma con un range più elevato.

I input [A]	Vout [V]	ADC out	I lin [A]	Errore [A]
-10	1,38260	1708	-9,98966	0,01034
-9	1,40763	1739	-8,98946	0,01054
-8	1,43208	1768	-8,05380	-0,05380
-7	1,45825	1801	-6,98907	0,01093
-6	1,48343	1833	-5,95661	0,04339
-5	-5,01832	1862	-5,02095	-0,02095
-4	1,53394	1894	-3,98849	0,01151
-3	1,55873	1925	-2,98829	0,01171
-2	1,58375	1956	-1,98810	0,01190
-1	1,60862	1986	-1,02017	-0,02017
0	1,63393	2018	0,01229	0,01229
1	1,65826	2048	0,98022	-0,01978
2	1,68365	2080	2,01268	0,01268
3	1,70911	2111	3,01288	0,01288
4	1,73358	2141	3,98081	-0,01919
5	1,75859	2172	4,98100	-0,01900
6	1,78381	2203	5,98120	-0,01880
7	1,80911	2234	6,98139	-0,01861
8	1,83449	2265	7,98158	-0,01842
9	1,85993	2297	9,01404	0,01404
10	1,88549	2329	10,04650	0,04650

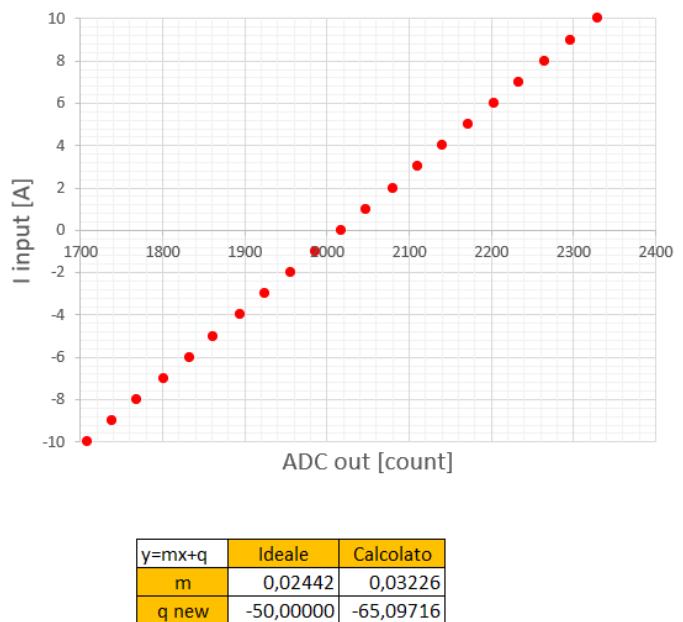


Figura 82 - Tabella dei valori mediati di corrente; relativo grafico e parametri della retta calcolati.

Fonte: produzione propria

V input[V]	Vout[V]	ADC out	V lin [V]	Errore [V]
0	0,03407	3	-0,00059	-0,00059
1	0,14889	186	0,99770	-0,00230
2	0,29770	369	1,99598	-0,00402
3	0,44657	553	2,99972	-0,00028
4	0,59529	736	3,99801	-0,00199
5	0,74333	919	4,99629	-0,00371
6	0,89299	1104	6,00549	0,00549
7	1,04092	1286	6,99832	-0,00168
8	1,19047	1471	8,00752	0,00752
9	1,33832	1653	9,00035	0,00035
10	1,48609	1836	9,99863	-0,00137
11	1,63475	2019	10,99692	-0,00308
12	1,78425	2204	12,00611	0,00611
13	1,93213	2386	12,99894	-0,00106
14	2,08093	2570	14,00268	0,00268
15	2,23024	2753	15,00097	0,00097
16	2,37906	2937	16,00471	0,00471
17	2,52698	3120	17,00300	0,00300
18	2,67563	3303	18,00128	0,00128
19	2,82431	3486	18,99957	-0,00043
20	2,97275	3670	20,00331	0,00331
21	3,12083	3851	20,99068	-0,00932
22	3,26937	4035	21,99442	-0,00558

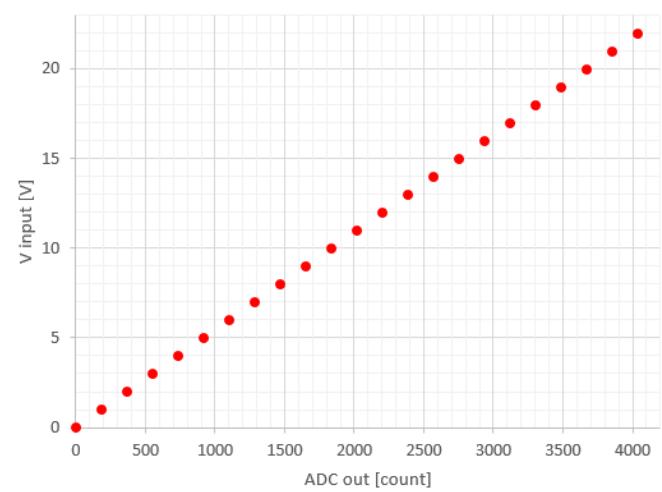


Figura 83 - Tabella dei valori mediati di tensione; relativo grafico e parametri della retta calcolati.

Fonte: produzione propria

4.7 Monitoraggio della scarica con carico elettronico

Dopo aver completato lo sviluppo dell'ultima versione del software in Python e aver caratterizzato il sistema di acquisizione, sono stati effettuati tre test di scarica a corrente costante (di valori rispettivamente 5A, 10A, 15A), utilizzando il carico elettronico.

Il setup sperimentale è mostrato in Figura 84, mentre lo schema di collegamento è mostrato in Figura 85. Da quest'ultimo si vede che la batteria è collegata al carico attraverso due cavi, con resistenza corrispettivamente $R_a = 0,029\Omega$ e $R_b = 0,097\Omega$. Avendo a disposizione un multimetro palmare con portata massima 10A è stato utilizzato per monitorare solo il test da 5A (e quindi non riportato nello schema appena indicato), durante il quale R_a presenta una resistenza maggiore, pari $0,600\Omega$, visto che il multimetro palmare posto in serie al circuito può essere visto come una resistenza, il cui valore misurato è pari a $0,571\Omega$. Per i restanti test ci si è affidati dei valori di corrente misurato dal carico.

Il blocco di misura di corrente del sistema di acquisizione è collegato in serie al percorso caratterizzato da R_a , mentre il blocco di misura della tensione dello stesso sistema è collegato ai capi della batteria. Il multimetro Agilent 34411A [27] è posto in parallelo al blocco di misura della tensione per avere una misura di riferimento da cui poi poter stimare l'errore confrontando il valore misurato dal sistema con quello misurato dal multimetro. Per tale scopo non è stato utilizzato il valore di tensione misurato dal carico elettronico perché appunto vi è una differenza di potenziale, dovuta ai resistori dei conduttori.



Figura 84 - A sinistra il setup sperimentale per i test di scarica della batteria, a destra, un ingrandimento riferito al test da 5A.

Fonte: produzione propria

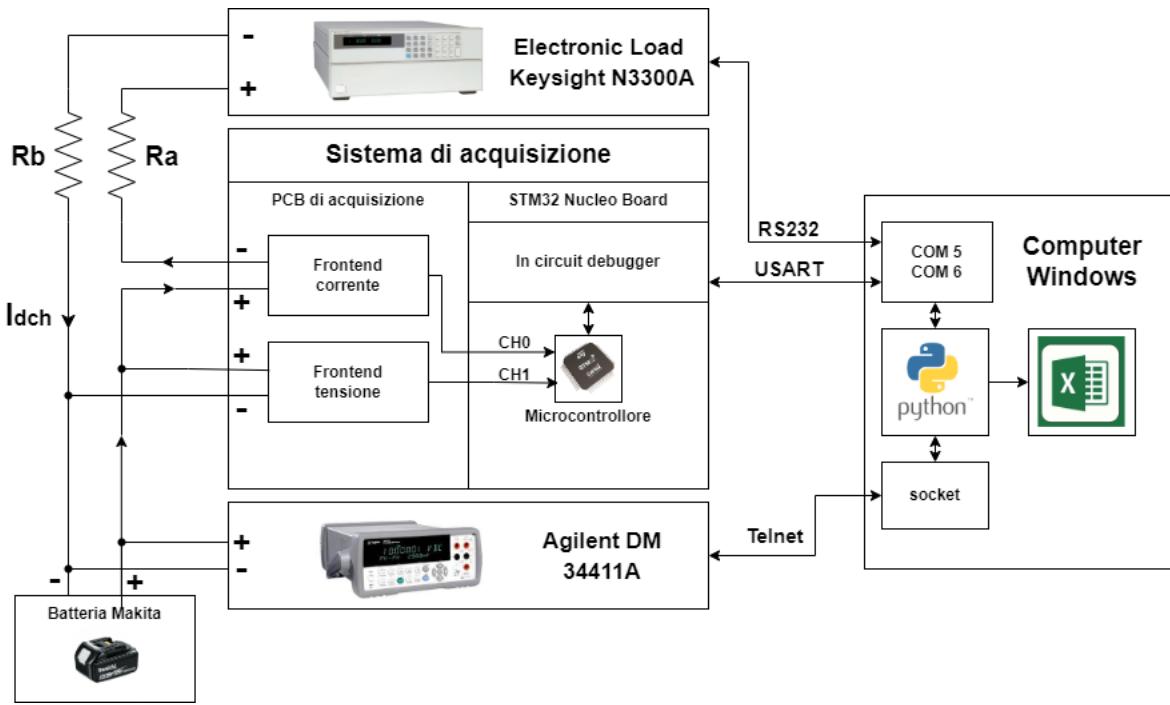


Figura 85 - Schema concettuale del setup sperimentale utilizzato per effettuare i test di scarica con il carico programmabile.

Fonte: produzione propria

Per eseguire il test è stato avviato il software in Python e selezionata la voce “3”. Da terminale viene immesso il valore desiderato di corrente che il carico dovrà assorbire costantemente durante il test. Il carico elettronico comunica con RS232, attraverso un convertitore RS232-USB, sulla COM5 del PC i dati ricevuti, i quali vengono mostrati a terminale. Il multimetro comunica la tensione misurata ai capi della batteria via telnet al PC. Infine, il sistema di acquisizione comunica tramite USART i valori mediati dei registri corrispondenti alla tensione e alla corrente misurata dal sistema di acquisizione sperimentale. Una volta scaricata la batteria è stato fermato manualmente il programma premendo “s”, salvando così i dati su un file di log Excel.

Alcune righe dei dati raccolti, contenuti, nel file corrispondente alla scarica a 10A, sono riportati in Figura 86. I risultati sperimentali sono stati riassunti nella Tabella 9.

s_num	time	Eload_I [A]	Eload_V [V]	CH0	CH1	sys_I [A]	sys_V [V]	mult_tension [V]
1	10-02-2023_14-07-12	10,0132	19,4645	2328	3625	10,01424	19,75783	19,7277133
2	10-02-2023_14-07-13	10,013	19,4507	2329	3623	10,0465	19,74692	19,7134758
3	10-02-2023_14-07-13	10,013	19,4438	2329	3621	10,0465	19,73601	19,7062039
4	10-02-2023_14-07-14	10,0131	19,4342	2329	3619	10,0465	19,7251	19,6969813
5	10-02-2023_14-07-14	10,0132	19,4239	2328	3618	10,01424	19,71964	19,6880869

Figura 86 - Alcune righe del file di log dei dati raccolti con il software in Python.

Fonte: produzione propria

Tabella 9 - Risultati sintetici dei test di scarica della batteria.

Corrente impostata [A]	5	10	15
Corrente media sistema [A]	5,0078	10,0330	15,0830
Corrente media carico [A]	5,0129	9,9773	15,0140
Timestamp inizio test [s]	29-09-2023 13-01-23	02-10-2023 14-07-12	02-10-2023 16-21-21
Timestamp fine test [s]	29-09-2023 13-54-53	02-10-2023 14-34-51	02-10-2023 16-38-50
Tempo trascorso [s]	3210	1659	1049
Carica ideale fluita [Ah]	4,4583	4,6083	4,3708
Carica fluita secondo il sistema [Ah]	4,4653	4,6236	4,3749
Carica fluita secondo il carico [Ah]	4,4699	4,5979	4,3749
Errore ideale carico [Ah]	0,0115	0,0105	0,0041
Errore ideale sistema [Ah]	0,0069	0,0152	0,0242
Errore ideale carico %	11,6189	10,5297	4,1155
Errore ideale sistema %	6,9976	15,3308	24,3687

La tabella presenta le seguenti righe, le cui colonne sono riferite ai valori di corrente di dei test eseguiti:

- “Corrente impostata [A]”: la corrente di scarica impostata dal programma in Python;
- “Corrente media sistema [A]”: la corrente ottenuta mediando i valori di corrente letti dal sistema di acquisizione;
- “Corrente media carico [A]”: la corrente ottenuta mediando valori di corrente misurati dal carico elettronico;
- “Timestamp inizio test”: marca temporale indicante il tempo di inizio del test;
- “Timestamp fine test”: marca temporale indicante il tempo di fine del test;
- “Tempo trascorso [s]”: intervallo di tempo che esprime la durata del test in secondi;
- “Carica ideale fluita [Ah]”: carica idealmente fornita dalla batteria al carico durante il test;
- “Carica fluita secondo il sistema [Ah]”: carica fornita dalla batteria al carico durante il test, secondo il sistema di acquisizione; ottenuta integrando la corrente rilevata dal sistema a partire da 0 a “Tempo trascorso [S]”;
- “Carica fluita secondo il carico [Ah]”: carica fornita dalla batteria al carico durante il test, secondo il carico elettronico; ottenuta integrando la corrente rilevata dal carico elettronico a partire da 0 a “Tempo trascorso [S]”;
- “Errore ideale carico [Ah]”: differenza tra “Carica fluita secondo il carico [Ah]” e “Carica ideale fluita [Ah]”;

- “Errore ideale sistema [Ah]”: differenza tra “Carica fluita secondo il sistema [Ah]” e “Carica ideale fluita [Ah]”;
- “Errore ideale carico %”: “Errore ideale carico [Ah]” ma espresso in termini percentuali rispetto a “Carica ideale fluita [Ah]”;
- “Errore ideale sistema %”: “Errore ideale carico [Ah]” ma espresso in termini percentuali rispetto a “Carica ideale fluita [Ah]”;

Calcolando la carica ideale che sarebbe fluita nell’intervallo di tempo a seconda del test, il sistema di acquisizione sotto test sbaglia percentualmente di più all’aumentare della corrente in gioco rispetto a quanto sbaglia il carico elettronico.

In Figura 87 viene mostrato l’andamento della tensione nel tempo durante il test. Si può notare come la tensione della batteria si abbassi più velocemente all’aumentare dell’intensità della corrente di scarica; risultato che conferma quanto detto nel paragrafo 2.3. Si nota come la tensione di cutoff venga raggiunta prima all’aumentare dell’intensità della corrente. I punti sperimentali sono talmente fitti che il grafico sembra composto da linee, non bisogna scordare però che è stata effettuata un’acquisizione a tempo discreto.

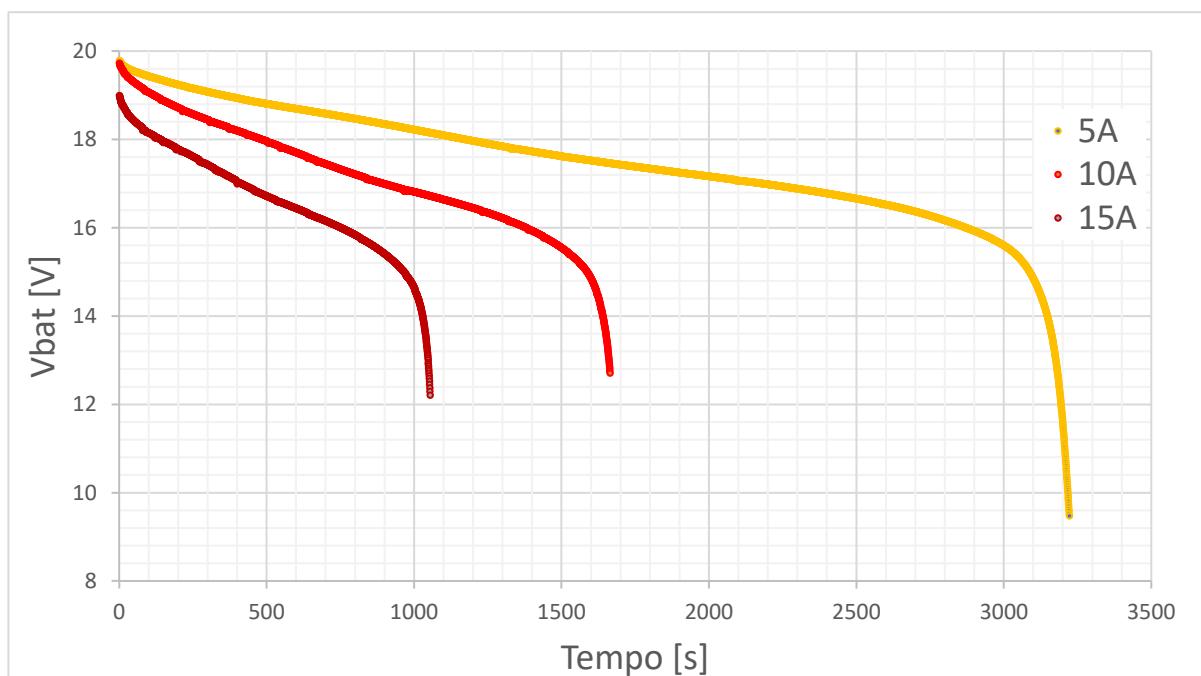


Figura 87 - Tensione nella batteria nel tempo durante i test di scarica.

Fonte : produzione propria

4.8 Monitoraggio della ricarica

Il procedimento per eseguire il test di ricarica è analogo a quello del test di scarica, se non per il fatto che, quando si utilizza il programma in Python, si scelga la voce “5” visto che viene utilizzato solo il sistema di acquisizione e il multimetro digitale. Il setup sperimentale è mostrato in Figura 88, mentre lo schema di collegamento in Figura 89. Integrando la corrente nel tempo, utilizzando il metodo dei trapezi [37], è stata calcolata una carica di 4,43Ah, fornita dal caricabatterie alla batteria Makita. Questo è un valore plausibile visto che questo processo si ricarica è stato effettuato dopo il test di scarica a 10A e prima del test di scarica da 15A. In Figura 90 e in Figura 91 sono riportati gli andamenti della tensione e della corrente, rispettivamente.



Figura 88 - Setup sperimentale per il monitoraggio della ricarica della batteria.

Fonte: produzione propria

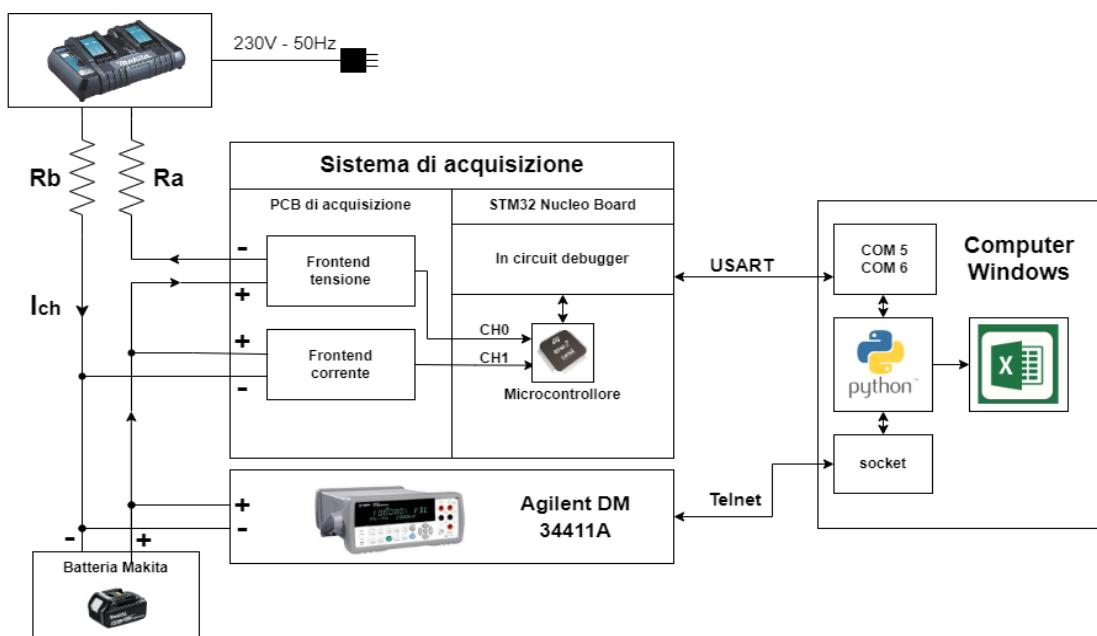


Figura 89 - Schema concettuale del setup sperimentale utilizzato per effettuare i test di ricarica con il caricabatterie Makita.

Fonte: produzione propria

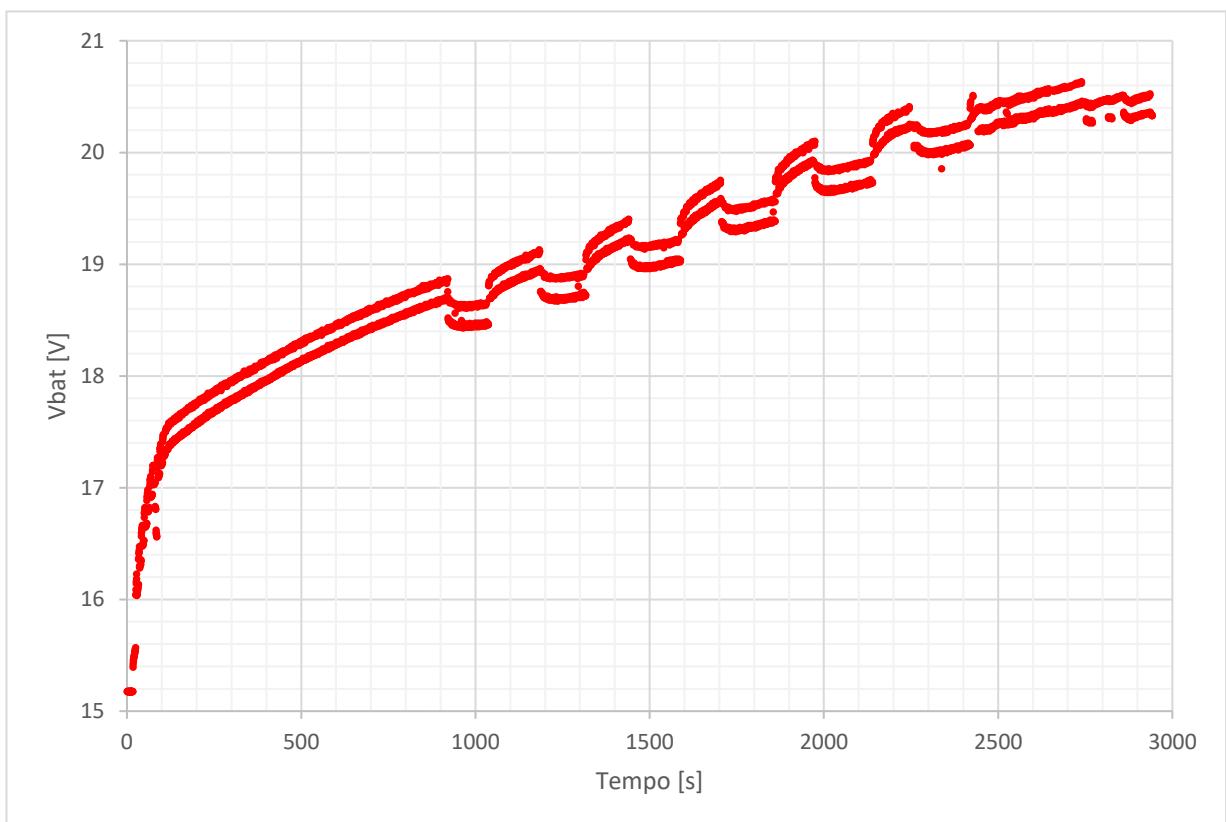


Figura 90 - Tensione della batteria nel tempo durante la ricarica.

Fonte: produzione propria

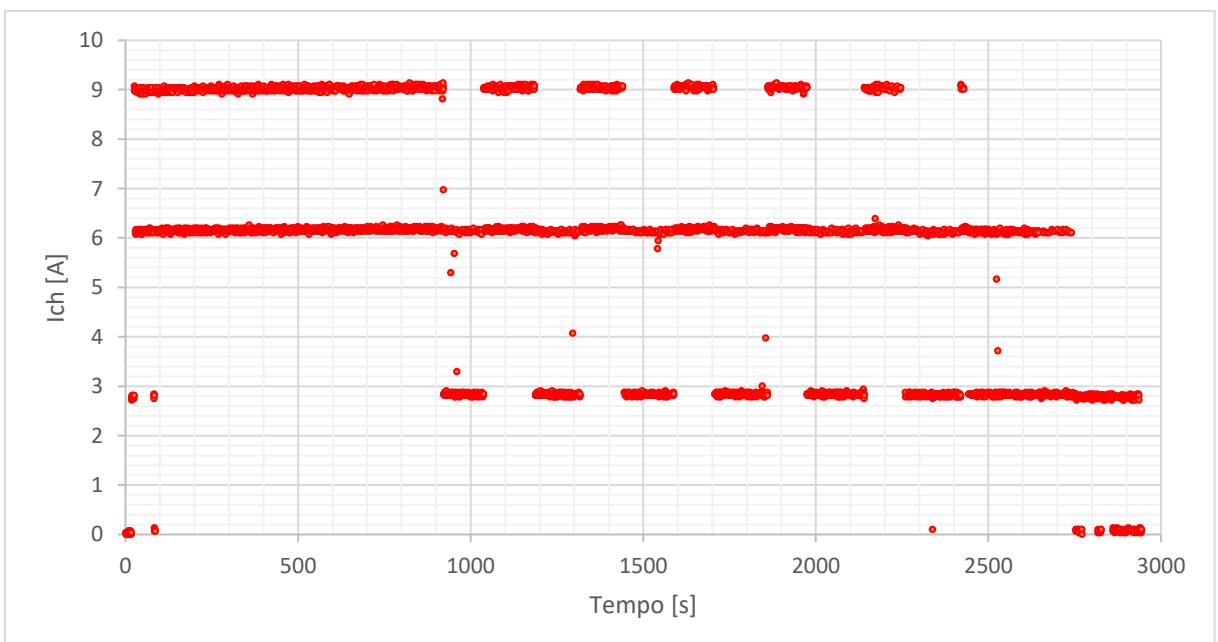


Figura 91 - Corrente di ricarica nel tempo.

Fonte: produzione propria

4.9 Monitoraggio di un elettrotensile

Per concludere l'attività sperimentale, è stato collegato il sistema di monitoraggio ad un elettrotensile, un comune avvitatore Bosch (non avendo a disposizione un avvitatore Makita, quindi la batteria è diversa da quella precedentemente usata), come mostrato in Figura 92. Il collegamento è analogo a quello realizzato per la scarica con il carico elettronico, come era stato precedentemente mostrato in Figura 92, se no per il fatto che al posto del carico elettronico c'è un trapano. Per salvare i dati è stato ancora utilizzato il logger in Python, selezionando la voce "5" del menu. In Figura 93 vengono mostrate alcune righe del file di log dei dati rilevati, mentre in Figura 94 e in Figura 95 i grafici di corrente e tensione rispettivamente.



Figura 92 - Sistema di monitoraggio montato su un avvitatore Bosch.

Fonte: produzione propria

s_num	time	Eload_I [A]	Eload_V [V]	CH0	CH1	sys_I [A]	sys_V [V]	mult [V]
1	10-01-2023_13-50-28	disconnected	disconnected	2017	3558	-0,01997	19,39233	disconnected
2	10-01-2023_13-50-29	disconnected	disconnected	2018	3559	0,012292	19,39779	disconnected
3	10-01-2023_13-50-29	disconnected	disconnected	2019	3559	0,044556	19,39779	disconnected
4	10-01-2023_13-50-30	disconnected	disconnected	2020	3559	0,076821	19,39779	disconnected
5	10-01-2023_13-50-30	disconnected	disconnected	2020	3558	0,076821	19,39233	disconnected
6	10-01-2023_13-50-31	disconnected	disconnected	2019	3559	0,044556	19,39779	disconnected
7	10-01-2023_13-50-31	disconnected	disconnected	2018	3559	0,012292	19,39779	disconnected
8	10-01-2023_13-50-32	disconnected	disconnected	2019	3558	0,044556	19,39233	disconnected
9	10-01-2023_13-50-32	disconnected	disconnected	2076	3442	1,883624	18,75954	disconnected
10	10-01-2023_13-50-33	disconnected	disconnected	2040	3518	0,722108	19,17413	disconnected
11	10-01-2023_13-50-33	disconnected	disconnected	2042	3509	0,786636	19,12503	disconnected
12	10-01-2023_13-50-34	disconnected	disconnected	2073	3454	1,786831	18,825	disconnected
13	10-01-2023_13-50-34	disconnected	disconnected	2108	3379	2,916083	18,41587	disconnected
14	10-01-2023_13-50-35	disconnected	disconnected	2071	3463	1,722302	18,8741	disconnected
15	10-01-2023_13-50-35	disconnected	disconnected	2077	3457	1,915888	18,84137	disconnected
16	10-01-2023_13-50-36	disconnected	disconnected	2084	3459	2,141739	18,85228	disconnected

Figura 93 - File di log del monitoraggio.

Fonte: produzione propria

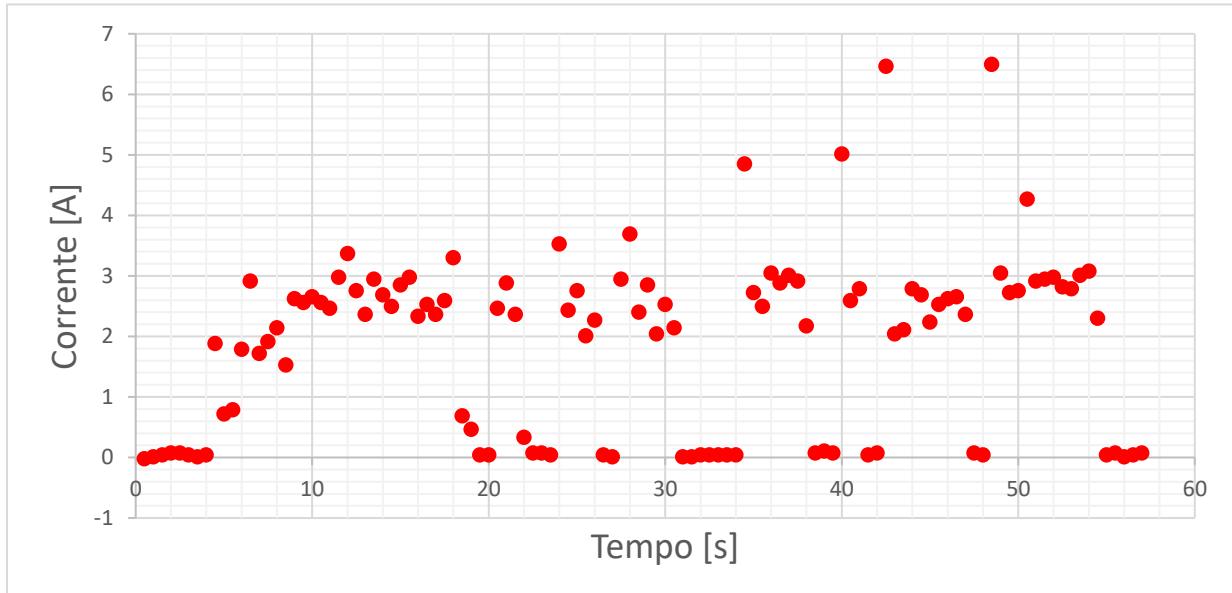


Figura 94 - Corrente utilizzata dal trapano nel tempo.

Fonte: produzione propria

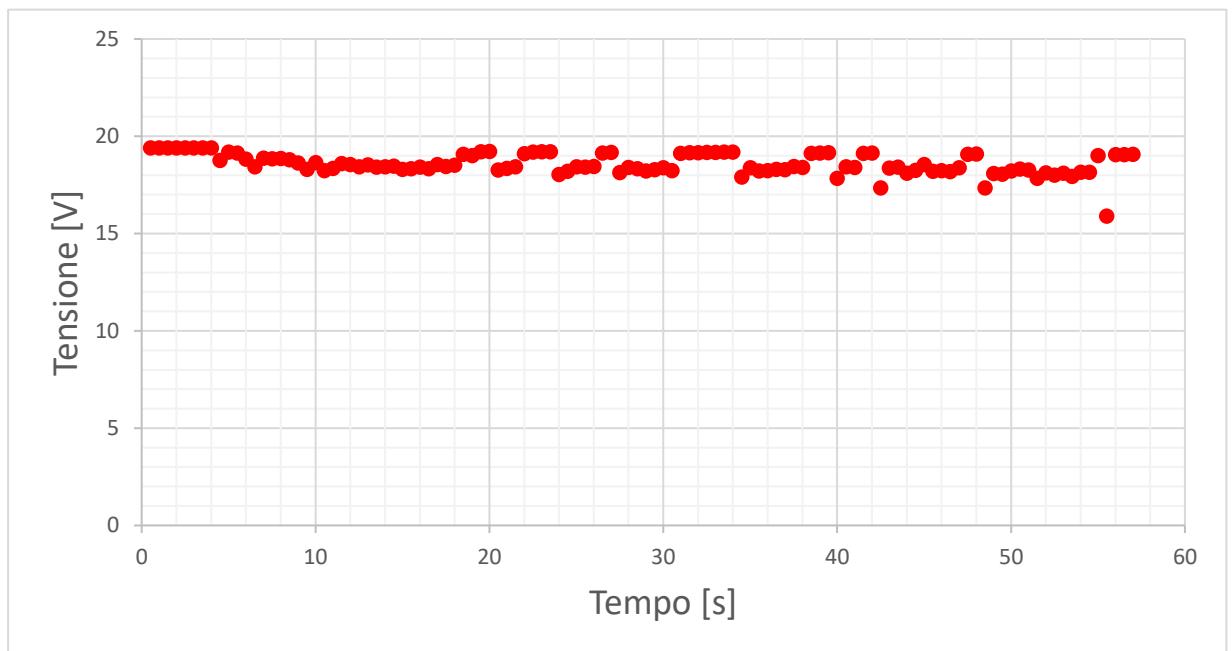


Figura 95 - Tensione della batteria nel tempo.

Fonte: produzione propria

Il test aveva scopo puramente dimostrativo, è stato utilizzato il trapano a intervalli di durata irregolare e per una breve durata complessiva.

Come mostrato dai grafici la misurazione di tensione e corrente funziona.

Si sarebbe potuto aumentare la frequenza di campionamento.

Conclusioni

L'attività di tesi ha riguardato la progettazione di un sistema wireless per il monitoraggio della carica della batteria di elettroutensili alimentati a batteria. La progettazione della comunicazione IoT è stata fatta solo concettualmente, mentre è stato realizzato un prototipo funzionante per il monitoraggio della carica a livello di nodo.

Quest'ultimo si compone di una scheda elettronica (PCB), contenente sia un circuito per le misure di tensione e di corrente, e di una Nucleo Board contenente un microcontrollore, programmato in C, per convertire digitalmente i segnali analogici del PCB, mediari, e inviarli ad un computer.

È stato sviluppato un programma in Python, per raccogliere i dati ricevuti dal microcontrollore e dagli strumenti utilizzati per i test sperimentali, per poi salvarli in un file Excel. I dati sono stati successivamente analizzati e riportati in tabelle e grafici, utilizzati per trarre le conclusioni di questa tesi, il cui scopo era di dimostrare la fattibilità e mostrare un prototipo funzionante. La sua ottimizzazione e ingegnerizzazione viene di seguito solo suggerita in vista di sviluppi futuri.

Il risparmio energetico e la miniaturizzazione della soluzione sono due importanti aspetti trascurati in questa trattazione, visto che la soluzione definitiva dovrà essere contenuta all'interno della scocca di una batteria e alimentarsi da quest'ultima, consumando la minore potenza possibile. Per fare ciò si potrebbe realizzare un unico PCB contenente i circuiti di misura e il microcontrollore, utilizzando i valori più alti di resistenza e togliendo i led di illuminazione. Inoltre, il microcontrollore dispone di diversi "sleep-mode", da utilizzare insieme a una gestione intelligente del campionamento, aumentandone la frequenza quando l'elettroutensile viene utilizzato per poi ridurla fino allo spegnimento dell'ADC e al passaggio del micro alla modalità "sleep" quando inattivo. Per capire quando l'elettroutensile è in uso si può utilizzare un interrupt esterno, il quale si attiva al superamento di una soglia di tensione, scelta nel circuito elettronico. Anche il sensore di Hall potrebbe in futuro essere sostituito con un resistore di shunt seguito da INA, come mostrato nel 3.2.1. Questa scelta è dipendente da fattori sia economici, legati alla quantità di sistemi che si vogliono produrre, sia legati alle prestazioni metrologiche che si vogliono raggiungere. Si potrebbe anche pensare di realizzare un resistore di shunt direttamente sul PCB, eliminando così un componente. Lo stadio di rilevazione della tensione può essere migliorato inserendo un filtraggio e riducendo il range di misura per aumentarne la risoluzione, ad esempio

da 0-22V a 14-22V. L'alimentazione del PCB non è stata approfondita visto che era fornita dalla Nucleo Board, si potrebbe pensare di realizzare uno stadio di alimentazione switching ad alto rendimento.

Bisognerà aggiungere un modulo LoRa al sistema in modo da renderlo un dispositivo IoT; servirà quindi completare la FSM del firmware in C integrando la comunicazione con il modulo attraverso seriale nello stato “Wait 2”.

Per quanto riguarda il software in Python, vista la sua versatilità in altri contesti (richiedenti la raccolta, l'elaborazione, la visualizzazione e il salvataggio dei dati), si potrebbe sviluppare una semplice interfaccia grafica per semplificare l'utilizzo del programma da parte dell'utente, dando la possibilità di settare i parametri di test, di avviarlo e di generare e visualizzare grafici sia in tempo reale che in un secondo momento.

Una volta ottimizzato il sistema di acquisizione a livello di nodo si potranno implementare soluzioni di ottimizzazione della gestione globale dei nodi e la comunicazione finale con l'utente proposte nel paragrafo 1.5.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare tutte le persone che mi sono state vicino finora.

Ringrazio molto i miei relatori, il Prof. Emiliano Sisinni e il Prof. Alessandro Depari, che mi hanno guidato e aiutato in questi lunghi mesi di lavoro.

Ringrazio tutti i professori con cui ho avuto a che fare, tra cui il Prof. Paolo Bellagente, per avermi insegnato Python, l'Ing. Alessandro Musatti, per avermi introdotto a SCPI, e il Prof. Marco Pasetti, per i consigli, nonché i tecnici di laboratorio e tutti, veramente tutte le persone che mi hanno aiutato e consigliato.

Un grazie particolare a mamma e papà a cui devo tutto, che mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo senza chiedermi nulla in cambio, ai miei nonni Vittorio e Giuliana, e a tutta la mia famiglia che mi vuole bene.

Un grazie di cuore a Gloria che mi è sempre stata vicina, ha sempre creduto in me nei momenti più difficili di questo percorso, e che mi ha aiutato con l'impaginazione di questa tesi.

Volevo ringraziare tutti gli amici di una vita, gli amici dell'Università di Brescia, e della Sabeo. È bello incontrarvi ogni volta e passare del buon tempo insieme.

Grazie davvero a tutti voi.

Ultimo ma non meno importante,

*“voglio ringraziarmi per aver creduto in me,
voglio ringraziarmi per aver fatto questo duro lavoro,
voglio ringraziarmi per non avere giorni liberi,
voglio ringraziarmi per non aver mai mollato. “*

Cit. Snoop Dogg

Bibliografia

- [1] «Che cos'è l'Internet of Things (IoT)? | Oracle Italia». [Online]. Disponibile su: <https://www.oracle.com/it/internet-of-things/what-is-iot/>
- [2] «Alla scoperta dell'Internet of Things», Focus.it. [Online]. Disponibile su: <https://www.focus.it/tecnologia/digital-life/internet-of-things-internet-delle-cose>
- [3] K. Rose, S. Eldridge, e L. Chapin, «The Internet of Things: An Overview».
- [4] «Digital Twin - Maurizio Griva.pdf».
- [5] «Smart Farming - Sistema Per La Gestione Dell'agricoltura di Precisione». Consultato: 8 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.sigmaconsulting.it/it/prodotti-servizi/smart-farming/>
- [6] S. Arora, R. Gambheer, e M. Vohra, *Design of secure IoT systems: a practical approach across industries*. New York [NY]: McGraw Hill, 2021.
- [7] V. Lavecchia, «Differenza tra i servizi Cloud Computing IaaS, PaaS e SaaS», Informatica e Ingegneria Online. Consultato: 12 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://vitolavecchia.altervista.org/differenza-tra-i-sevizi-cloud-computing-iaas-paas-e-saas/>
- [8] R. INTERNET, «Radio - Autorizzazioni e licenze», mise.gov.it. Consultato: 12 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.mimit.gov.it/it/comunicazioni/radio/autorizzazioni-e-licenze>
- [9] «Homepage», LoRa Alliance®. Consultato: 7 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://lora-alliance.org/>
- [10] D. Linden, K. W. Beard, e T. B. Reddy, A c. di, *Linden's handbook of batteries*, Fifth edition. New York: McGraw-Hill, 2019.
- [11] S. Petrovic, P. Kurzweil, e J. Garche, *Electrochemical energy storage*. New York: McGraw Hill, 2022.
- [12] R. Lazzari, E. Micolano, M. Conte, e F. Vellucci, «Procedura di prova RSE-ENEA per batterie litio-ioni».
- [13] «197280-8 - Batteria LXT® BL1850B 5,0 Ah». Consultato: 8 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.makita.it/product/197280-8.html>
- [14] «196933-6 - Caricabatterie doppio LXT®». Consultato: 8 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.makita.it/product/196933-6.html>
- [15] D. S. Leibson, «Nozioni di base sulla misurazione della corrente: Parte 1 – Resistori di rilevamento corrente».
- [16] S. Franco, *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*, Fourth edition. Indian edition. India: McGraw-Hill Education, 2016.
- [17] P. Mazzoldi, M. Nigro, e C. Voci, *Elementi di fisica. 2. Elettromagnetismo e onde*, 3 ed. a cura di R.C. Iotti, G. Barbero. Napoli: Edises, 2021.
- [18] «Sensors | Overview | Allegro MicroSystems». Consultato: 12 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.allegromicro.com/en/products/sense>
- [19] «ACS758-Datasheet.pdf».
- [20] «OPA350UA - datasheet.PDF».
- [21] «Microcontrollers (MCU) and Microprocessors (MPU) - STMicroelectronics». Consultato: 12 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors.html>
- [22] «STM32 Microcontrollers (MCUs) - STMicroelectronics». Consultato: 12 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>
- [23] «STM32_L152RE - datasheet.pdf».
- [24] «Description of STM32L1 HAL and low-layer drivers - user manual UM1816.pdf».
- [25] «Iso-tech IDM101 Instruction Manual.pdf».

- [26] «Logic_Analyzer_Datasheet - Az Delivery.pdf».
- [27] «Agilent 34411A.pdf».
- [28] «What Is Pulse Charging For Lithium-Ion Batteries? What Is The Impact Of Pulse Charging On Lithium-Ion Batteries?» Consultato: 19 ottobre 2023.
[Online]. Disponibile su: <https://www.linkedin.com/pulse/what-pulse-charging-lithium-ion-batteries-impact-bruce-feng/>
- [29] «KDM-360CTF - Multimetro digitale -Datasheet.pdf».
- [30] «TENMA 72-10395 -Multimetro digitale - Datasheet.pdf».
- [31] «N3300 Series DC Electronic Loads - Datasheet.pdf».
- [32] «eLUX». Consultato: 13 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su:
<https://elux.unibs.it/>
- [33] «electronic load fundamentals.pdf».
- [34] «SCPI». Consultato: 13 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su:
<https://www.ivifoundation.org/scpi/>
- [35] «Keysight DC Electronic Loads - User's Guide.pdf».
- [36] «Keysight DC Electronic Loads - Programming Guide.pdf».
- [37] «Regola del trapezio», *Wikipedia*. 10 novembre 2022. Consultato: 21 ottobre 2023. [Online]. Disponibile su:
https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Regola_del_trapezio&oldid=130398155

Elenco delle figure

Figura 1 - Organizzazione del lavoro	4
Figura 2 - Rappresentazione delle potenzialità dell'IoT.....	8
Figura 3 - Scenario d'uso dell'IoT nello Smart Farming.....	10
Figura 4 - Cella elementare IoT	12
Figura 5 - Gateway nel contesto IoT.	12
Figura 6 - Schema concettuale di una WSN.	13
Figura 7 - Tipologie di servizi cloud.	15
Figura 8 - Architettura di una rete LoRaWAN.	20
Figura 9 - Topologia del sistema di monitoraggio della carica.....	22
Figura 10 - Cella elementare.	24
Figura 11 - Modello circuitale utilizzato.....	24
Figura 12 - Esempi di batterie primarie.....	28
Figura 13 - Esempi di batterie secondarie ricaricabili.	30
Figura 14 - Diagramma di Ragone.	32
Figura 15 - Tecnologie di batterie secondarie a confronto.....	33
Figura 16 - Andamento tipico, della tensione nel tempo, di una batteria scaricata a tensione costante, per qualunque tecnologia realizzativa.	35
Figura 17 - Effetto della temperatura sulla tensione a parità di corrente di scarica.	36
Figura 18 - Effetto dell'intensità della corrente di scarica sulla tensione della batteria.....	37
Figura 19 - Capacità in funzione della corrente di scarica a diversi valori di p.	38
Figura 20 - Effetti di influenza sulla durata della vita di una batteria.	39
Figura 21 - Alcuni elettroutensili Makita alimentati a batteria.....	40
Figura 22 - Specifiche tecniche della batteria Makita BL1850B.	40
Figura 23 - Caricabatterie Makita DC18RD.....	41
Figura 24 - Specifiche tecniche del caricabatterie Makita DC18RD.	41
Figura 25 - Schema interno di una batteria con sistema di monitoraggio della carica integrato.	42
Figura 26 - Schema concettuale della soluzione implementata.	44
Figura 27 - Schema concettuale della misura di corrente col metodo del resistore di shunt.	46
Figura 28 - Resistenze da considerare per il dimensionamento di uno shunt.....	47
Figura 29 - Connessione shunt a due terminali, con connessione Kelvin.	48
Figura 30 - Shunt con connessione Kelvin integrata.....	48
Figura 31 - Configurazione low-side a sinistra, high-side a destra.....	49
Figura 32 - Effetto Hall su un conduttore a forma di nastro sottile.	51
Figura 33 - Campo magnetico generato da un filo rettilineo e formula di Biòt Savart.....	51
Figura 34 - Categorie di sensori di Hall del sito Allegro Microsystem.	52
Figura 35 - Circuito Partitore di tensione.	52
Figura 36 - Schema elettrico del PCB di acquisizione.....	53
Figura 37 - Design del PCB.....	54
Figura 38 - PCB realizzato.	54
Figura 39 - Sistema di acquisizione realizzato, nel suo alloggiamento stampato in 3D.....	55
Figura 40 - Microcontrollore STM32 generico.	56
Figura 41 - Nucleo Board, con microcontrollore STM32L152RE.....	57
Figura 42 - Datasheet del microcontrollore STM32L152RE.	58
Figura 43 - Architettura interna e periferiche principali utilizzate (in giallo).	59
Figura 44 - Diagramma temporale delle conversioni eseguite dall'ADC.....	61
Figura 45 - Macchina a stati del firmware.....	62
Figura 46 - Directory del firmware e CUBE MX.	63

Figura 47 – Flow chart semplificato del firmware del microcontrollore scritto in C.	64
Figura 48 - Scarica della batteria attraverso il circuito resistivo, rappresentato schematicamente a destra.	66
Figura 49 - A sinistra l'analizzatore logico, in centro il connettore artigianale, a destra il pinout di questo.....	67
Figura 50 - Setup sperimentale per il monitoraggio dei pin digitali del connettore giallo.	68
Figura 51 - Monitoraggio della ricarica, con il log dati fatto a mano.	68
Figura 52 - Tensione della batteria in funzione del tempo durante la ricarica.	69
Figura 53 - Ingrandimento di una parte del grafico in Figura 52.	69
Figura 54 – Schema di collegamento, comune a tutti i sensori sotto test.	72
Figura 55 - Setup sperimentale per la caratterizzazione dei sensori.	72
Figura 56 - Package vari, Pinout generale, e applicazione tipica.	73
Figura 57 - Caratteristica ideale del sensore ACS758LCB-050B.	74
Figura 58 - Caratteristica sperimentale del sensore ACS758LCB-050B alimentato a VCC=5V.....	74
Figura 59 - Caratteristica sperimentale del sensore ACS758LCB-050B alimentato a VCC=3,3V.....	75
Figura 60 - Caratteristica ideale del sensore ACS758LCB-050U.....	75
Figura 61 - Caratteristica sperimentale del sensore ACS758LCB-050U alimentato a VCC=5V.	76
Figura 62 - Caratteristica sperimentale del sensore ACS758LCB-050U alimentato a VCC=3,3V.	76
Figura 63 - Pinout e caratteristica tipica dell'uscita del sensore CZ-3A03.	77
Figura 64 - Adattatore del sensore per il montaggio su breadboard.....	77
Figura 65 - Applicazione tipica del sensore, con rilevamento di sovraccorrenti.	78
Figura 66 - Punti sperimentali e linearizzazione dell'uscita del sensore CZ-3A03.	78
Figura 67 - Debug del firmware.....	79
Figura 68 – Schema di principio dei collegamenti per la verifica del timing dell'ADC.	79
Figura 69 - Misure mediate ogni $T_c=0,5s$	80
Figura 70 - Singola misura mediata composta da N misure.....	80
Figura 71 - Singola misura composta dalla coppia di conversioni dei due canali analogici, a sinistra; distanza temporale tra le due conversioni della misura, a destra.....	80
Figura 72 - Carico programmabile Keysight N3300A, fronte a sinistra, retro a destra.....	81
Figura 73 - Multimetro digitale Agilent 34411A.....	82
Figura 74 - Loghi di Python ed Excel (a sinistra e a destra rispettivamente).	83
Figura 75 – Diagramma di flusso semplificato del programma in Python.	85
Figura 76 - Terminale di interfaccia del programma in Python.	86
Figura 77 - Prime righe del foglio Excel contenente i dati salvati.	86
Figura 78 - Schema concettuale del setup sperimentale per la caratterizzazione del sistema di acquisizione.....	87
Figura 79 - Setup sperimentale per la caratterizzazione del sistema di acquisizione.....	88
Figura 80 - Prime righe di un foglio corrispettivo a un valore di corrente in ingresso al sistema.	89
Figura 81 - Prime righe di un foglio corrispettivo a un valore di tensione in ingresso al sistema.	90
Figura 82 - Tabella dei valori mediati di corrente; relativo grafico e parametri della retta calcolati ...	91
Figura 83 - Tabella dei valori mediati di tensione; relativo grafico e parametri della retta calcolati ...	91
Figura 84 - A sinistra il setup sperimentale per i test di scarica della batteria, a destra, un ingrandimento riferito al test da 5A.....	92
Figura 85 - Schema concettuale del setup sperimentale utilizzato per effettuare i test di scarica con il carico programmabile.	93
Figura 86 - Alcune righe del file di log dei dati raccolti con il software in Python.	93
Figura 87 - Tensione nella batteria nel tempo durante i test di scarica.	95
Figura 88 - Setup sperimentale per il monitoraggio della ricarica della batteria.	96
Figura 89 - Schema concettuale del setup sperimentale utilizzato per effettuare i test di ricarica con il caricabatterie Makita.	96

Figura 90 - Tensione della batteria nel tempo durante la ricarica.....	97
Figura 91 - Corrente di ricarica nel tempo.....	97
Figura 92 - Sistema di monitoraggio montato su un avvitatore Bosch.....	98
Figura 93 - File di log del monitoraggio.....	98
Figura 94 - Corrente utilizzata dal trapano nel tempo.....	99
Figura 95 - Tensione della batteria nel tempo.....	99

Elenco delle tabelle

Tabella 1 - Tecnologie, caratteristiche e applicazioni delle batterie primarie.....	29
Tabella 2 - Principali caratteristiche e applicazioni delle batterie secondarie.....	31
Tabella 3 - Vantaggi e svantaggi delle batterie a ioni di litio.....	33
Tabella 4 - Parametri prestazionali tipici per le celle litio-ioni.....	34
Tabella 5 - Coefficiente di Peukert (p) per alcuni tipi di batteria a temperatura ambiente	37
Tabella 6 - Tassi di autoscarica di alcune tipologie di batterie.	38
Tabella 7 - Definizione temporale degli intervalli di ricarica.....	71
Tabella 8 - Stima della carica.....	71
Tabella 9 - Risultati sintetici dei test di scarica della batteria.....	94