



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE
Da un secolo, oltre.

DOTTORATO DI RICERCA IN *Ingegneria meccanica*

CICLO XXXVII - PON ex DM1061

Analisi e sviluppo di nuovi sistemi per la power unit per la micromobilità

Settore Scientifico Disciplinare
PSPPI

Dottorando
Dott.
Laschi Maurizio

Supervisore
Prof.
Vangi Dario
Gulino Michelangelo Santo

Coordinatore
Prof.
Ferrara Giovanni

Salvo eventuali più ampie autorizzazioni dell'autore, la tesi può essere liberamente consultata e può essere effettuato il salvataggio e la stampa di una copia per fini strettamente personali di studio, di ricerca e di insegnamento, con espresso divieto di qualunque utilizzo direttamente o indirettamente commerciale.

Ogni altro diritto sul materiale è riservato.

Desidero esprimere la mia più profonda gratitudine ai miei genitori, che con il loro amore e sostegno instancabile mi hanno guidato in questo percorso. Un ringraziamento speciale va a mia moglie, per la sua pazienza, comprensione e costante incoraggiamento. Ai miei professori, che con la loro guida e preziosi insegnamenti hanno arricchito il mio cammino accademico, va tutta la mia riconoscenza. Infine, un sincero grazie ai miei colleghi di laboratorio, per la collaborazione, le discussioni stimolanti e il supporto condiviso in ogni fase di questa avventura scientifica. Senza di voi, questo traguardo non sarebbe stato possibile.

Sommario

Introduzione.....	4
Stato dell'arte.....	9
Obiettivi e Metodologia della Ricerca	20
Caratterizzazione delle Celle Innovative	26
Sviluppo e Progettazione degli Accumulatori	36
Conclusioni e Sviluppi Futuri	41
Bibliografia.....	45

Negli ultimi anni, le città di tutto il mondo hanno vissuto una profonda trasformazione nel trasporto personale, trainata in gran parte dall'ascesa della micromobilità. Questo termine comprende veicoli di piccole dimensioni e leggeri, come i monopattini elettrici (e-scooter), le biciclette elettriche (e-bike) e altri veicoli elettrici leggeri (LEV), che si collocano tra il camminare e i tradizionali sistemi di trasporto pubblico (Poon et al., 2018). In particolare, le loro dimensioni ridotte, la convenienza economica e il basso impatto ambientale rispondono con efficacia a sfide urbane quali ingorghi stradali e inquinamento atmosferico (Goodenough & Park, 2013).

L'adozione della micromobilità asseconda l'esigenza di soluzioni di trasporto sostenibili, efficienti e meno dipendenti dai combustibili fossili. Molti centri urbani affrontano da tempo problemi di traffico e inquinamento (Ellis et al., 2010), con notevoli ricadute sulla qualità della vita e i costi economici. I LEV, alimentati da accumulatori avanzati, comunemente identificati con il termine "batterie", si configurano come un'alternativa meno inquinante e silenziosa ai veicoli tradizionali (Xu et al., 2012). Con l'aumentare della densità urbana e il crescere delle infrastrutture a basso impatto ambientale, la micromobilità diviene un tassello fondamentale per la mobilità del futuro.

Alla base di questa trasformazione troviamo i sistemi di accumulo elettrochimico, spesso indicati con la sigla EES (Electrochemical Energy Storage). Tra essi, le batterie agli ioni di litio (Li-ion) si sono imposte come tecnologia dominante, grazie all'elevata densità energetica e alle ottime prestazioni (Manthiram, 2020). Dalla loro introduzione commerciale nei primi anni '90, hanno rivoluzionato l'accumulo di energia in svariati settori, dall'elettronica di consumo ai veicoli elettrici. Il loro successo dipende soprattutto dall'elevata energia specifica (Wh/kg), un requisito cruciale nei LEV, che necessitano di dimensioni compatte e peso contenuto.

La diffusione della micromobilità basata sulle batterie Li-ion è inoltre in linea con gli obiettivi di contrasto al cambiamento climatico (Gaines, 2014). I veicoli elettrici leggeri non producono emissioni allo scarico e, qualora l'energia di ricarica provenga da fonti rinnovabili, l'impronta di carbonio si riduce ulteriormente (Sankar et al., 2023). Ciononostante, rimangono aperte alcune criticità: l'approvvigionamento di litio, cobalto e nichel implica costi, disponibilità limitata, questioni etiche e impatti ambientali associati all'estrazione. La gestione del fine vita di queste batterie, con la necessità di sviluppare infrastrutture di riciclo più estese, è un'ulteriore sfida non ancora pienamente risolta (European Commission, 2020). Per controbilanciare tali problematiche, si stanno sviluppando nuove chimiche, sistemi di riciclo più efficaci e, non da ultimo, sistemi di accumulo alternativi come i supercondensatori ibridi (Zhang et al., 2021).

I supercondensatori ibridi Figura 1 rappresentano una possibile evoluzione delle classiche batterie Li-ion, combinando la capacità di ricarica rapida, la maggior sicurezza tipica dei supercondensatori e la densità energetica delle celle tradizionali. A ciò si aggiungono le possibilità offerte dai sistemi di gestione dell'energia basati sull'intelligenza artificiale, in grado di ottimizzare i cicli di carica e scarica e di estendere la vita utile delle batterie (Egbue & Long, 2012). In tal modo, tali veicoli possono concorrere alla formazione di un futuro più sostenibile e responsabile per il trasporto urbano.

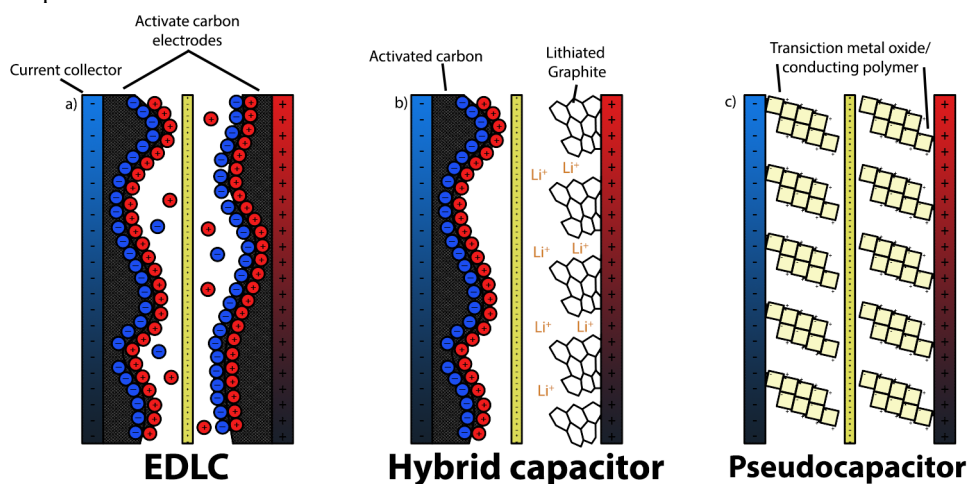


Figura 1 Confronto tra i principali meccanismi di carica tra i principali sistemi di accumulo elettrochimico (EES)

La transizione energetica verso una mobilità sostenibile è fra le priorità per mitigare il cambiamento climatico e migliorare la qualità della vita nelle aree urbane (Commissione Europea, 2020; Consiglio dell'Unione Europea, 2020). L'Unione Europea, con il pacchetto "Fit for 55" e l'European Green Deal, ha fissato obiettivi ambiziosi quali ridurre del 55% le emissioni di gas serra entro il 2030 e raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 (Consiglio dell'Unione Europea, 2020). Un elemento chiave di tale strategia è la trasformazione del settore dei trasporti, riducendo progressivamente l'utilizzo di combustibili fossili e contenendo gli impatti ambientali.

I micro-veicoli elettrici leggeri (LEV), come ad esempio e-bike e monopattini elettrici, offrono una risposta concreta alle criticità sopra evidenziate, combinando ridotti consumi energetici, assenza di emissioni dirette e praticità d'uso (Istituto per la Ricerca sull'Energia, n.d.). Essi si configurano come reali alternative ai veicoli a combustione interna in contesti urbani, contribuendo a ridurre la congestione, l'inquinamento atmosferico e quello acustico. A ciò si aggiunge

la loro capacità di integrarsi con i sistemi di trasporto pubblico, favorendo un approccio multimodale e più efficiente agli spostamenti.

Al contempo, la tecnologia su cui si basano tali veicoli non è priva di limiti, specialmente per quanto riguarda gli accumulatori elettrochimici (Yang et al., 2011). Sebbene le batterie Li-ion si siano affermate per via dell'elevata densità energetica, della buona durata e dei tempi di ricarica relativamente brevi, la loro produzione e lo smaltimento sollevano questioni ambientali ed etiche, nonché problemi di sicurezza. Per far fronte a tali aspetti, è fondamentale investire in ricerca e sviluppo di soluzioni più sicure, efficienti e sostenibili, accompagnate da normative che regolamentino l'intero ciclo di vita delle batterie (Commissione Europea, 2020).

In quest'ottica, la presente tesi esplora la possibilità di adottare supercondensatori ibridi, che promettono una vita utile maggiore e tempi di ricarica ridotti, pur mantenendo prestazioni comparabili in termini di voltaggio e densità energetica (Zhang et al., 2021). Inoltre, alcune tipologie di HSC consentono il refitting degli accumulatori.

Il lavoro di Laschi et al. (2023) ha contribuito allo sviluppo di un innovativo microveicolo per la mobilità urbana, combinando le caratteristiche di un monoruota e di un monopattino elettrico. Questo veicolo è progettato per migliorare la sicurezza, il comfort e la convenienza nel trasporto urbano, utilizzando un sistema di controllo innovativo e soluzioni di accumulo energetico avanzate.

La transizione energetica verso una mobilità sostenibile rappresenta una delle sfide più pressanti per mitigare gli effetti del cambiamento climatico e migliorare la qualità della vita nelle aree urbane (Commissione Europea; Consiglio dell'Unione Europea). In tale prospettiva, l'Unione Europea ha stabilito obiettivi ambiziosi, tra cui il pacchetto "Fit for 55" e l'European Green Deal, volti rispettivamente a ridurre del 55% le emissioni di gas serra entro il 2030 e a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 (Consiglio dell'Unione Europea; Commissione Europea). Un elemento cruciale di questa strategia è la trasformazione del settore dei trasporti, attraverso la graduale eliminazione dei combustibili fossili e la riduzione dell'impatto ambientale complessivo.

I micro-veicoli elettrici leggeri, come ad esempio le e-bike e i monopattini elettrici, rappresentano una risposta concreta alle sfide sopra menzionate, poiché uniscono consumi energetici ridotti, assenza di emissioni dirette e praticità d'uso (Istituto per la Ricerca sull'Energia). Essi si configurano come valide alternative ai veicoli a combustione interna, in particolare nei contesti urbani, contribuendo alla diminuzione del traffico, dell'inquinamento atmosferico e dell'inquinamento acustico (Consiglio dell'Unione Europea). Inoltre, la diffusione dei LEV è coerente con la visione di città più sostenibili e promuove la multimodalità del trasporto, in quanto tali mezzi si integrano agevolmente con il trasporto pubblico, favorendo una maggiore efficienza degli spostamenti (Commissione Europea).

Nonostante i numerosi vantaggi, la tecnologia alla base dei LEV presenta alcune criticità, in gran parte riconducibili agli accumulatori elettrochimici (Sankar et al., 2023). Le batterie agli ioni di litio (Li-ion) dominano attualmente il mercato per via dell'elevata densità energetica, della lunga durata e dei tempi di ricarica relativamente brevi (Istituto per la Ricerca sull'Energia). Tuttavia, la produzione e lo smaltimento di queste batterie comportano rilevanti questioni ambientali ed etiche, dovute alla dipendenza da materiali rari come litio, cobalto e nichel. Tale dipendenza si traduce in un impatto significativo sugli ecosistemi, nonché in preoccupazioni relative alle condizioni di lavoro nelle aree di estrazione (Sankar et al., 2023). Inoltre, lo smaltimento delle batterie esauste contribuisce all'aumento dei rifiuti elettronici, rendendo imprescindibile lo sviluppo di adeguate infrastrutture per il riciclo (Istituto per la Ricerca sull'Energia). Per questi motivi nel 2023 è stato finanziato il Progetto Long Life to Micromobility (Life2M), il cui focus è introdurre una flotta di microveicoli alimentati tramite supercondensatori ibridi.

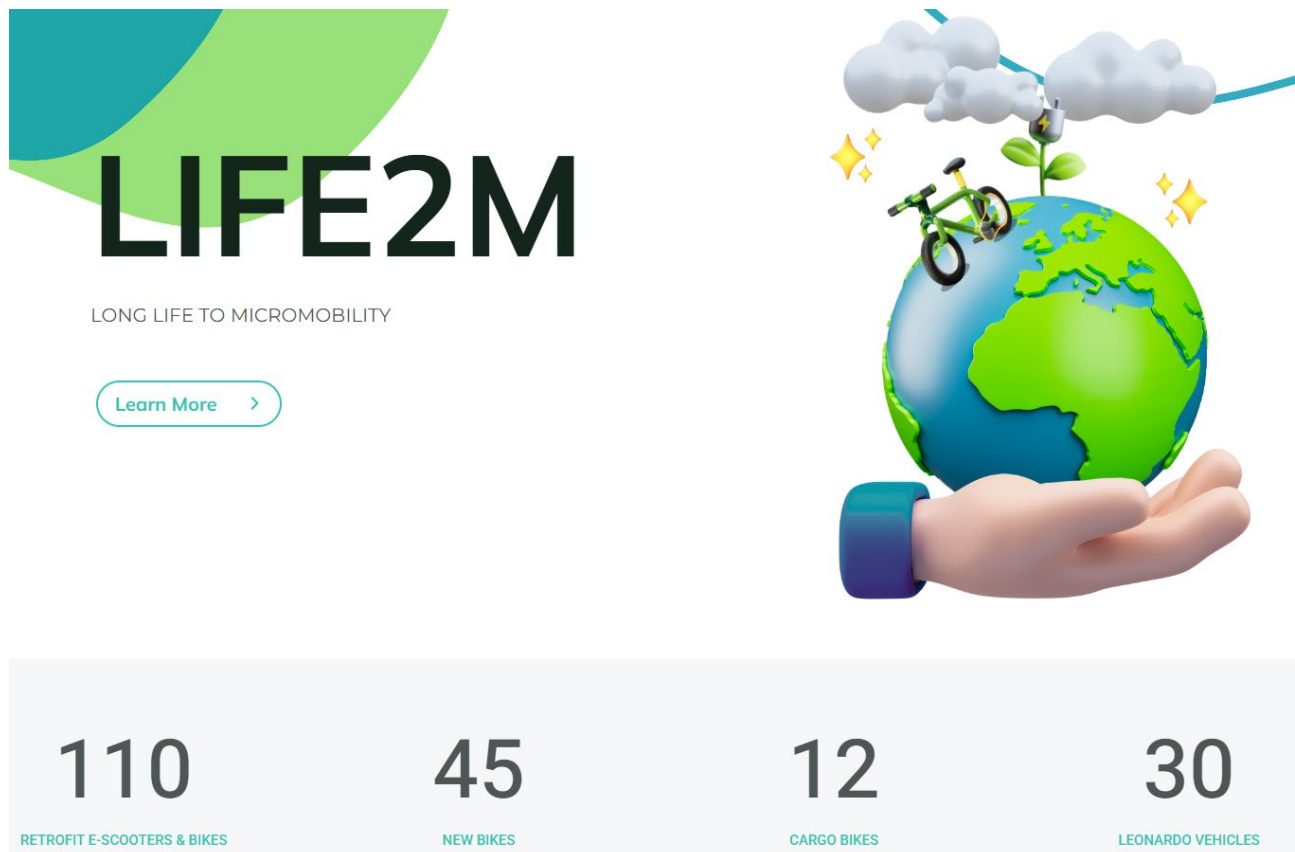


Figura 2 Dettagli progetto Life

Un ulteriore aspetto critico riguarda la sicurezza degli accumulatori, soggetti a fenomeni come la fuga termica se non gestiti correttamente, con potenziali rischi per gli utenti (Istituto per la Ricerca sull'Energia). Contestualmente, il progressivo esaurimento delle risorse minerarie rende urgente lo sviluppo di soluzioni alternative e l'adozione di approcci circolari che includano il recupero dei materiali e il riuso delle batterie (Sankar et al., 2023).

Per affrontare tali sfide, risulta quindi necessario investire in ricerca e sviluppo per progettare sistemi di accumulo più sicuri, efficienti e sostenibili. In parallelo, è essenziale definire normative che regolamentino l'intero ciclo di vita delle batterie, promuovendo l'economia circolare e minimizzando l'impatto ambientale (Commissione Europea; Consiglio dell'Unione Europea). Solo in questo modo i micro-veicoli elettrici leggeri potranno esprimere appieno il proprio potenziale quale strumento per una mobilità più responsabile e a basso impatto.

La soluzione proposta da questa tesi di dottorato è quella di valutare l'uso di supercondensatori ibridi per compiere questo salto tecnologico; infatti, stando quanto riportato sui datasheet dei vari produttori, non solo garantiscono una vita utile maggiore sia in termini di cicli di carica e scarica, sia in termini di vita a data di scadenza. Inoltre, alcune tipologie di questi HSC, dati i loro voltaggi operativi e le loro caratteristiche in termini di energia specifica, pressoché identici alla loro controparte batteria, permettono di effettuare il refitting degli accumulatori dei veicoli elettrici circolanti, per esempio in una flotta di monopattini in sharing, senza comprometterne la funzionalità o altro.

La struttura della tesi di dottorato intitolata *Analisi e sviluppo di nuovi sistemi per la power unit per la micromobilità* è stata concepita per fornire una visione organica e completa delle attività di ricerca, dalla contestualizzazione del problema fino alla definizione delle prospettive future. In apertura, l'Introduzione evidenzia il contesto e le motivazioni alla base del lavoro, mettendo in luce l'esigenza sempre più pressante di soluzioni innovative nell'ambito della micromobilità sostenibile. Vengono chiariti gli obiettivi della ricerca, ossia sviluppare e analizzare nuovi sistemi di accumulo e conversione energetica specificamente pensati per microveicoli a basso impatto ambientale. Infine, una sezione dedicata illustra la struttura della tesi, anticipando al lettore la suddivisione in capitoli e la logica sottesa al percorso metodologico.

Nel secondo capitolo, dedicato allo Stato dell'arte, viene discusso il panorama attuale delle tecnologie per le power unit, con particolare attenzione agli accumulatori elettrochimici tradizionali, le batterie agli ioni di litio, e ai limiti che ne ostacolano l'adozione su larga scala. Un approfondimento è riservato ai supercondensatori ibridi, presentati come alternativa o complemento alle tecnologie più diffuse, per via delle loro caratteristiche di compatibilità con l'elettronica a bordo dei veicoli, più alta vita utile e caratteristiche lato ricarica migliori.

Nel terzo capitolo, *Obiettivi e Metodologia della Ricerca*, si chiariscono in modo dettagliato gli obiettivi principali e le domande di ricerca cui si intende rispondere. Viene presentato il metodo sperimentale seguito, che combina approcci di laboratorio e, dove possibile, test su prototipi. Sono inoltre delineate le collaborazioni instaurate aziende del settore, e vengono menzionate le risorse necessarie per la caratterizzazione elettrochimica e meccanica delle celle per la costruzione dei primi esemplari di accumulatori.

Nel quarto capitolo, *Caratterizzazione delle Celle Innovative*, è descritta la metodologia di testing adottata per valutare le prestazioni meccaniche ed elettriche delle nuove celle. Questa fase è fondamentale per confrontare i risultati ottenuti con quelli offerti dagli accumulatori agli ioni di litio, mettendo in luce punti di forza e debolezze dei diversi sistemi. L'analisi include l'osservazione della stabilità ciclica, della capacità di erogazione di potenza in diversi range di temperatura e delle eventuali problematiche legate all'integrazione in dispositivi di piccole dimensioni.

Il quinto capitolo, *Sviluppo e Progettazione degli Accumulatori*, descrive come le informazioni raccolte nei precedenti capitoli vengano utilizzate per progettare e realizzare accumulatori destinati a microveicoli come il prototipo "Leonardo". Si affrontano i criteri di dimensionamento, le topologie costruttive più idonee e le soluzioni proposte per minimizzare gli ingombri, ottimizzare i flussi termici e ridurre il peso complessivo senza sacrificare le prestazioni energetiche.

Nel sesto capitolo, *Applicazioni e Implicazioni*, l'implementazione pratica nel veicolo "Leonardo" diventa un esempio concreto di come la ricerca possa tradursi in un risultato tangibile. Si valutano le potenzialità industriali, le ricadute normative e le prospettive legate allo sviluppo di sistemi di accumulo sempre più intelligenti, in grado di dialogare con infrastrutture di ricarica smart e di integrarsi in reti di mobilità condivisa.

Infine, nelle *Conclusioni e Sviluppi Futuri*, si presentano le principali evidenze emerse, le limitazioni riscontrate e le possibili linee di evoluzione delle ricerche. L'intera trattazione si chiude con una Bibliografia curata, che raccoglie le fonti consultate e costituisce la base scientifica su cui è stato costruito l'intero lavoro di dottorato.

La continua evoluzione delle tecnologie di accumulo elettrochimico riveste un ruolo essenziale nello sviluppo di LEV, tra cui e-bike, monopattini elettrici e altri mezzi di trasporto compatti a propulsione elettrica. Attualmente, le batterie agli ioni di litio (Li-ion) rappresentano lo stato dell'arte in questo settore, grazie all'elevata densità energetica, alla lunga vita operativa e al calo progressivo dei costi di produzione. La loro diffusione è ulteriormente favorita dal fatto che le prestazioni superano di gran lunga quelle offerte da altre tecnologie precedenti, rendendole di fatto la principale scelta in applicazioni per la mobilità elettrica.

Nello specifico, (Rezvanianiani et al. (2014)) hanno fornito una panoramica sulle caratteristiche operative e sui modelli di degradazione delle batterie Li-ion, mettendo in luce come la sicurezza e l'affidabilità siano fattori critici per garantire prestazioni costanti e prolungate nel tempo. In parallelo, (Duan et al. (2020)) hanno approfondito il tema della sicurezza, esaminando le principali modalità di guasto e suggerendo strategie per lo sviluppo di batterie agli ioni di litio più affidabili e con elevata densità energetica. Inoltre, gli aspetti legati all'influenza della temperatura sul ciclo di vita e sulle prestazioni di tali batterie sono stati ampiamente discussi da (Waldmann et al. (2014)). Tale studio, condotto con analisi post-mortem, ha permesso di evidenziare come le variazioni termiche possano influire in modo significativo sui meccanismi di invecchiamento, con ripercussioni sulle prestazioni e sulla durata.

A fronte dell'interesse crescente per dispositivi sempre più sicuri ed efficienti, la ricerca si sta orientando anche verso soluzioni alternative, quali le batterie allo stato solido, che promettono densità energetiche più elevate e un migliore profilo di sicurezza. Ad oggi, lo sviluppo di tali batterie è ancora in fase di studio e non privo di sfide, sia sul fronte dei materiali sia su quello dell'industrializzazione su larga scala.

Per quanto riguarda le batterie Li-ion già affermate sul mercato, sono quattro le chimiche principali che ricoprono un ruolo di primo piano nelle applicazioni LEV:

1. **Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC):** garantisce un buon equilibrio tra densità energetica, costo ed efficienza, con tensioni nominali di circa 3,6–3,7 V per cella.
2. **Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA):** offre densità energetiche elevate e lunga durata, risultando particolarmente adatta laddove peso e dimensioni ridotte sono prioritari.
3. **Lithium Iron Phosphate (LFP):** seppur caratterizzata da una densità energetica inferiore, presenta ottima stabilità termica e un'ottima sicurezza, con tensioni nominali intorno a 3,2 V per cella.
4. **Lithium Titanate Oxide (LTO):** si distingue per la lunga vita operativa e per le capacità di ricarica rapida, grazie all'anodo basato su titanato di litio, con tensioni nominali di circa 2,4 V per cella.

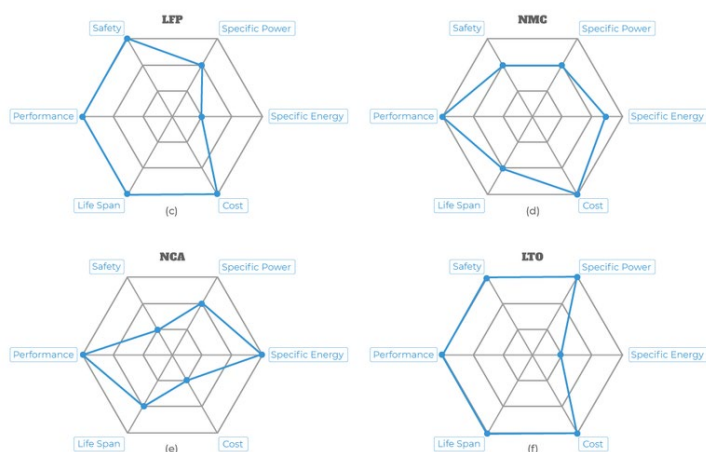


Figura 3 Confronto delle performance delle principali chimiche di batterie

La scelta della chimica più adatta dipende dalle esigenze applicative in termini di autonomia, sicurezza, dimensioni e costi. NMC e NCA risultano preferibili quando è richiesta un'elevata densità energetica in spazi ridotti, mentre LFP e LTO pongono l'accento su robustezza, sicurezza e longevità. Comprendere le peculiarità di ciascuna chimica consente di orientare correttamente la progettazione dei sistemi di accumulo e di scegliere la soluzione più idonea in base agli obiettivi prestazionali e ai vincoli applicativi. In definitiva, il panorama attuale mette in risalto come la ricerca sulle batterie per i LEV sia in costante fermento,

mirando a ottimizzare sicurezza, affidabilità e prestazioni per rispondere al crescente fabbisogno di mobilità elettrica sostenibile.

Le batterie al Litio-Nichel-Manganese-Cobalto (NMC) rappresentano una classe di accumulatori agli ioni di litio ampiamente utilizzata in virtù dell'elevata densità energetica, delle prestazioni bilanciate e della grande versatilità in svariati ambiti applicativi, con particolare rilievo nel settore dei veicoli elettrici (EV) e dell'elettronica portatile. Da una prospettiva ingegneristica, comprendere a fondo le caratteristiche intrinseche di queste batterie risulta essenziale per ottimizzarne le prestazioni, la sicurezza e la longevità operativa.

Composizione Chimica e Struttura

Le batterie NMC presentano un catodo costituito da litio, nichel, manganese e cobalto, descritto generalmente dalla formula chimica $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, dove $x+y+z=1$. Le specifiche proporzioni di questi metalli possono essere regolate per migliorare determinate caratteristiche della batteria. Formulazioni comuni includono NMC111 (parti uguali di nichel, manganese e cobalto), NMC532, NMC622 e NMC811; in tutti i casi, i numeri indicano il rapporto proporzionale dei metalli nel catodo. Un contenuto più elevato di nichel ne aumenta la densità energetica, ma potrebbe compromettere la stabilità termica e la sicurezza. Al contrario, una maggiore percentuale di manganese contribuisce a migliorare la stabilità termica, sebbene possa ridurre la densità energetica complessiva. Il cobalto, invece, fornisce stabilità strutturale e buone prestazioni, ma il suo impiego comporta costi elevati e impone riflessioni di natura etica e ambientale a causa delle pratiche estrattive (Manthiram, 2020).

Dal punto di vista strutturale, i catodi NMC presentano un reticolo a strati che favorisce l'intercalazione e la de-intercalazione degli ioni di litio durante i cicli di carica e scarica. Questa configurazione incide in maniera determinante sulle prestazioni elettrochimiche, inclusi capacità, tensione e vita utile. Tuttavia, la struttura a strati può risultare vulnerabile a fenomeni di degradazione come il cation mixing, in cui litio e metalli di transizione si scambiano di posizione, provocando un progressivo decadimento della capacità nel tempo (Zhao et al., 2017).

Prestazioni Elettrochimiche

Le batterie NMC forniscono una tensione nominale compresa tra 3,6 e 3,7 V, caratteristica che le rende particolarmente indicate per applicazioni che richiedono elevata densità di energia. La capacità specifica del catodo, espressa in mAh/g, varia in base alla composizione: per esempio, la formulazione NMC111 raggiunge tipicamente valori compresi tra 160 e 180 mAh/g, mentre la NMC811 può arrivare fino a 200 mAh/g grazie all'elevato contenuto di nichel (Manthiram, 2020). Tale aumento della densità di energia, tuttavia, comporta spesso un peggioramento della stabilità termica e un'accelerazione dei processi di degradazione.

L'alta densità energetica (fino a 270 Wh/kg) costituisce uno dei principali vantaggi delle batterie NMC, soprattutto in ambito automobilistico, dove l'autonomia di percorrenza riveste un ruolo cruciale. Va tuttavia ricordato che l'incremento della densità energetica può comportare compromessi su altri parametri prestazionali, quali il numero di cicli di vita e la sicurezza. Di conseguenza, la scelta progettuale deve necessariamente bilanciare queste esigenze, tenendo conto delle specifiche richieste di impiego (Schimpe et al., 2017).

Stabilità Termica e Sicurezza

La stabilità termica è un aspetto fondamentale nella progettazione delle batterie, in quanto incide direttamente sul profilo di sicurezza. Le batterie NMC possiedono una stabilità termica moderata, pur essendo soggette a potenziali fenomeni di runaway termico in condizioni di utilizzo estreme, come sovraccarica, surriscaldamento o cortocircuiti interni. L'aumento della concentrazione di nichel, in particolare nelle formulazioni NMC811, tende a ridurre la stabilità termica rispetto a composizioni come NMC111 (Oswald & Gasteiger, 2023).

Per mitigare i rischi termici, in fase di progettazione si adottano diversi accorgimenti: sistemi di gestione termica, dispositivi di interruzione della corrente (CID) e sistemi avanzati di Battery Management System (BMS) che monitorano tensione, corrente e temperatura, intervenendo per evitare condizioni potenzialmente pericolose (Baccouche et al., 2021).

Ciclo di Vita e Meccanismi di Degradazione

La durata in cicli delle batterie NMC dipende da variabili quali la profondità di scarica (DoD), la temperatura operativa e la velocità di carica/scarica. I meccanismi di degradazione più comuni includono:

1. **Degradazione Strutturale:** i ripetuti processi di intercalazione/de-intercalazione di ioni di litio possono indurre modificazioni nella struttura cristallina, causando una progressiva perdita di capacità. Il fenomeno del

cation mixing, in cui litio e metalli di transizione si scambiano di posto, costituisce uno dei fattori chiave di questa degradazione strutturale (Britala et al., 2023).

2. **Decomposizione dell'Elettrolita:** tensioni elevate e temperature critiche possono portare alla decomposizione dell'elettrolita, favorendo la formazione di un interstrato solido (Solid Electrolyte Interphase, SEI) sulla superficie del catodo. Se ben stabilizzato, il SEI può proteggere il materiale attivo; tuttavia, una crescita eccessiva o disomogenea dello strato SEI aumenta la resistenza interna e determina cali di capacità (Farhat et al., 2017).
3. **Dissoluzione dei Metalli di Transizione:** in particolare, il manganese può migrare nell'elettrolita durante i cicli di carica e scarica, provocando una riduzione della capacità e un aumento della resistenza interna. Tale fenomeno risulta amplificato in condizioni di alta temperatura e tensione elevata (Britala et al., 2023).

Per prolungare la vita utile delle batterie NMC, si interviene ottimizzando la composizione del catodo, applicando rivestimenti protettivi e sviluppando elettroliti avanzati in grado di formare SEI stabili. Inoltre, un adeguato controllo termico e procedure di carica/scarica ottimali possono contribuire in misura significativa a rallentare la degradazione (Liu et al., 2020).

Considerazioni di Produzione

La produzione di batterie NMC si articola in diverse fasi fondamentali:

- **Sintesi dei Materiali:** i materiali catodici si ottengono tramite metodologie quali coprecipitazione, metodi sol-gel o reazioni allo stato solido. La scelta del metodo influisce su cristallinità, dimensioni delle particelle e morfologia, parametri che a loro volta condizionano le prestazioni elettrochimiche (Yoon et al., 2004).
- **Fabbricazione dell'Elettrodo:** il catodo sintetizzato viene mescolato con additivi conduttivi e leganti per formare una slurry, successivamente spalmata su un collettore di corrente (di solito in alluminio). L'elettrodo viene poi essiccato e calibrato (calendering) per raggiungere lo spessore e la densità desiderati (Zhao et al., 2017).
- **Assemblaggio della Cella:** gli elettrodi preparati sono assemblati assieme a separatore ed elettrolita nella forma di cella voluta (cilindrica, prismatica o a sacchetto). Questa fase deve avvenire in condizioni controllate per minimizzare le contaminazioni e garantire la qualità del prodotto finito.
- **Formazione e Aging:** a cella ultimata, si procede con una serie di cicli iniziali di carica/scarica, volti a stabilizzare l'interfaccia elettrolita-elettrodo (SEI) e a uniformare le caratteristiche elettrochimiche dell'accumulatore. A seguire, un periodo di invecchiamento (aging) permette di completare la stabilizzazione delle celle prima dell'uso finale (Su et al., 2021).

In conclusione, le batterie NMC costituiscono uno dei pilastri fondamentali nel panorama degli accumulatori agli ioni di litio per applicazioni avanzate. Grazie alla loro flessibilità in termini di composizione chimica, offrono un interessante compromesso tra densità energetica, stabilità termica e costi. Tuttavia, poiché ogni cambiamento nella formulazione influisce in modo sensibile sul comportamento elettrochimico, la progettazione e la produzione devono essere condotte con attenzione, tenendo conto delle esigenze specifiche di sicurezza, durata e prestazioni. Gli sviluppi futuri mirano a migliorare ulteriormente la stabilità termica e a contenere i fenomeni di degradazione, attraverso strategie di ottimizzazione dei materiali e l'adozione di metodologie avanzate di gestione e diagnostica delle celle.

Le batterie al Litio-Nichel-Cobalto-Alluminio (NCA) costituiscono una classe di accumulatori agli ioni di litio ampiamente impiegata nel settore dei veicoli elettrici (EV) e dei dispositivi elettronici ad alte prestazioni, in virtù dell'elevata densità di energia, della lunga vita operativa e della buona stabilità termica. Da una prospettiva ingegneristica, una conoscenza approfondita delle caratteristiche fondamentali delle batterie NCA risulta essenziale per poterle ottimizzare sia in termini di performance sia in termini di sicurezza, in numerose applicazioni.

Composizione Chimica e Struttura

Le batterie NCA presentano un catodo composto da litio, nichel, cobalto e alluminio, tipicamente descritto dalla formula $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$, con $x+y+z=1$. Una composizione comunemente adottata è $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$, dove il nichel costituisce stechiometricamente circa l'80% del catodo, il cobalto il 15% e l'alluminio il 5%. L'elevato contenuto di nichel garantisce una densità di energia più alta, il cobalto contribuisce alla stabilità strutturale, mentre l'alluminio migliora la stabilità termica. Analogamente ad altre chimiche agli ioni di litio, il catodo si presenta con una struttura lamellare che agevola l'intercalazione e la de-intercalazione degli ioni di litio durante i cicli di carica e scarica. Questa architettura a strati influisce in modo significativo sulla resa elettrochimica e sulla durabilità dell'accumulatore (Ghatak et al., 2018).

Prestazioni Elettrochimiche

Le batterie NCA sono particolarmente apprezzate per l'elevata densità energetica: la capacità specifica può variare da 180 a 200 mAh/g, rendendole adatte a sistemi dove la compattezza e il peso contenuto sono requisiti fondamentali. Un tipico valore di tensione nominale per cella NCA si aggira intorno a 3,6–3,7 V, in linea con altre chimiche di batterie al litio. Tuttavia, la scelta di una chimica NCA comporta anche considerazioni in termini di costi e sicurezza, poiché l'aumento della densità di energia è spesso accompagnato da una maggiore complessità nei sistemi di gestione termica e di protezione (Takoma Battery, 2023).

Stabilità Termica e Sicurezza

La stabilità termica rappresenta un fattore di cruciale importanza, direttamente correlato alla sicurezza operativa della batteria. La presenza di alluminio nel catodo NCA contribuisce a migliorare la resistenza alla fuga termica (*thermal runaway*), un fenomeno che può verificarsi in condizioni estreme (sovraccariche, cortocircuiti interni o temperature eccessive). Al tempo stesso, l'elevata percentuale di nichel, sebbene aumenti la densità energetica, può rendere la cella più suscettibile a instabilità termiche qualora venga sottoposta a stress operativi severi. Per ridurre il rischio di eventi pericolosi, è fondamentale integrare sistemi di gestione termica, tecnologie di protezione da sovracorrente e soluzioni avanzate di Battery Management System (BMS), in grado di monitorare e intervenire rapidamente su parametri quali tensione, corrente e temperatura (Battery Swap Cabinet, 2023).

Ciclo di Vita e Meccanismi di Degradazione

Le batterie NCA sono rinomate per la lunga vita operativa, caratteristica che le rende ideali in applicazioni dove i cicli di carica e scarica sono frequenti, come nei veicoli elettrici. Tuttavia, anche queste celle subiscono fenomeni di degradazione, tra cui:

1. **Degradazione Strutturale:** ripetuti cicli di intercalazione/de-intercalazione di ioni di litio possono modificare la struttura cristallina, compromettendo progressivamente la capacità di accumulo.
2. **Decomposizione dell'Elettrolita:** a tensioni e temperature elevate, l'elettrolita può decomporsi, generando strati interfaciali (SEI) sulla superficie del catodo che aumentano la resistenza interna e riducono la capacità disponibile.
3. **Dissoluzione dei Metalli di Transizione:** elementi come nichel e cobalto possono migrare nell'elettrolita durante i cicli di carica/scarica, provocando una perdita di capacità e un incremento della resistenza elettrica nel sistema (MDPI, 2023).

Le soluzioni per attenuare tali fenomeni di degrado comprendono l'ottimizzazione della composizione chimica del catodo, l'applicazione di rivestimenti protettivi, l'uso di elettroliti avanzati e una gestione termica accurata.

Considerazioni di Produzione

Il processo di fabbricazione delle batterie NCA si svolge attraverso diverse fasi critiche:

- **Sintesi dei Materiali:** il catodo NCA può essere sintetizzato mediante coprecipitazione, metodi sol-gel o reazioni allo stato solido; la scelta della tecnica incide sulla microstruttura del materiale, sulla cristallinità e, di conseguenza, sulle prestazioni elettrochimiche.
- **Fabbricazione dell'Elettrodo:** il materiale catodico viene combinato con additivi conduttivi e leganti per creare una slurry, poi depositata su un collettore di corrente (generalmente alluminio). Seguono essiccazione e calandratura per ottenere lo spessore e la densità desiderati.
- **Assemblaggio della Cella:** gli elettrodi, il separatore e l'elettrolita vengono assemblati nel formato richiesto (cilindrico, prismatico o a sacchetto). È essenziale mantenere un ambiente controllato per evitare contaminazioni e difetti.
- **Formazione e Invecchiamento:** la batteria subisce una serie di cicli di carica e scarica iniziali volti a stabilizzare lo strato interfacciale (SEI). A seguito della formazione, si procede con test di invecchiamento per uniformare le caratteristiche elettrochimiche delle celle e verificare eventuali anomalie prima della messa in commercio (Arena EV, 2023).

Applicazioni

Le batterie NCA trovano ampia diffusione nel settore automobilistico, grazie all'elevata densità di energia e alla lunga vita in cicli, che si traducono in un maggiore raggio di autonomia e in un'affidabilità prolungata per veicoli elettrici di fascia alta. Un esempio emblematico è rappresentato dall'impiego della chimica NCA in alcune serie di veicoli Tesla. Altre applicazioni includono dispositivi elettronici ad alte prestazioni e sistemi di accumulo energetico in cui l'ingombro e il peso ridotti risultano fondamentali (Takoma Battery, 2023).

Considerazioni Ambientali ed Economiche

La produzione di batterie NCA richiede metalli come nichel e cobalto, la cui estrazione presenta sfide di natura ambientale ed etica. In particolare, il cobalto risulta costoso e spesso proviene da filiere critiche e sensibili. Diverse strategie di ricerca e sviluppo puntano a ridurre la quantità di cobalto impiegata, senza compromettere in modo rilevante la stabilità e le prestazioni della cella. Parallelamente, stanno prendendo forma processi di riciclo e pratiche di approvvigionamento sostenibili per limitare l'impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita della batteria (Springer, 2024).

Sviluppi Futuri

La ricerca sulle batterie NCA prosegue, con l'obiettivo di potenziarne ulteriormente la densità energetica e migliorarne la stabilità termica. Tra le strategie attualmente allo studio vi sono la cosiddetta "drogaggio" (*doping*) con elementi in grado di rafforzare la matrice cristallina, l'aumento controllato del contenuto di nichel e l'utilizzo di elettroliti allo stato solido per ridurre i rischi di fuga termica. Tali sviluppi mirano a soddisfare le crescenti esigenze di efficienza, sicurezza e sostenibilità in un mercato dell'energia in rapida evoluzione (NCM, NCA, LFP, Solid-State - EV Battery Chemistry Explained, 2023).

Conclusioni

Le batterie NCA coniugano un'elevata densità di energia, una buona longevità e una discreta stabilità termica, affermandosi come soluzioni di riferimento per applicazioni ingegneristiche nell'automotive e nell'elettronica. Restano comunque aperte sfide legate alla sicurezza, ai costi di produzione e all'approvvigionamento dei materiali, che rendono necessaria una continua attività di ricerca e sviluppo per ottimizzare le prestazioni e la sostenibilità di questa tecnologia. Una padronanza approfondita degli aspetti strutturali, chimici e produttivi risulta cruciale per sfruttare appieno le potenzialità di queste batterie e favorirne l'ulteriore evoluzione nel panorama dell'accumulo energetico.

Le batterie al Litio-Ferro-Fosfato (LFP) appartengono alla categoria degli accumulatori agli ioni di litio, ma si distinguono per alcune proprietà peculiari che le rendono particolarmente interessanti in numerosi ambiti di applicazione, tra cui veicoli elettrici (EV) e sistemi di accumulo stazionari. Da una prospettiva ingegneristica, comprenderne le caratteristiche fondamentali risulta cruciale per ottimizzare le prestazioni e l'integrazione in diverse tecnologie.

Composizione Chimica e Struttura

Nelle batterie LFP, il catodo è costituito da litio, ferro e fosfato, organizzati in una struttura cristallina di tipo olivina. Questa struttura offre un'elevata stabilità termica e vantaggi in termini di sicurezza rispetto ad altre chimiche agli ioni di litio, principalmente grazie ai forti legami P–O del gruppo fosfato. Tali legami riducono il rischio di rilascio di ossigeno, prevenendo fenomeni di *thermal runaway* (fuga termica). Inoltre, l'assenza di metalli costosi e critici, come nichel e cobalto, mitiga le preoccupazioni di carattere ambientale ed etico legate alle filiere di approvvigionamento (Wikipedia).

Prestazioni Elettrochimiche

Le batterie LFP presentano una tensione nominale di circa 3,2 V per cella e una capacità specifica nell'ordine di 170 mAh/g. Sebbene la densità energetica sia inferiore rispetto ad altre formulazioni, come Nickel Manganese Cobalt (NMC) o Nickel Cobalt Aluminum (NCA), queste celle compensano con una maggiore stabilità termica e un'ottima durata in cicli. Grazie alla loro curva di scarica piatta, sono in grado di erogare una tensione relativamente costante, caratteristica molto apprezzata in applicazioni che richiedono un'alimentazione stabile (Wikipedia).

Stabilità Termica e Sicurezza

La stabilità termica rappresenta uno dei principali punti di forza delle batterie LFP. La struttura olivina del catodo consente di avere una temperatura di decomposizione elevata, riducendo la probabilità di fenomeni di *thermal runaway* anche in condizioni di sovraccarica o cortocircuito. Ciò rende queste batterie particolarmente adatte a contesti in cui la gestione termica è complicata o in cui la sicurezza riveste un'importanza prioritaria, come nei sistemi di accumulo energetico in aree remote o in applicazioni automotive con vincoli di sicurezza stringenti (Wikipedia).

Ciclo di Vita e Meccanismi di Degradazione

Le batterie LFP sono note per la loro longevità, con la possibilità di superare i 2.000 cicli di carica e scarica senza subire un degrado significativo della capacità. Questa lunga vita operativa deriva, in parte, dalla stabilità intrinseca del catodo e dalla minore tendenza alla formazione di uno strato di interfaccia solida (SEI) sulla superficie del catodo, un tipico percorso di degrado in altre chimiche agli ioni di litio. Tuttavia, parametri quali l'elevata corrente di scarica e le temperature di esercizio superiori alla norma possono comunque accelerare la perdita di capacità nel tempo (MDPI).

Considerazioni di Produzione

Il processo di produzione delle batterie LFP comprende diverse fasi fondamentali:

- **Sintesi dei Materiali:** il catodo a base di litio ferro fosfato può essere ottenuto tramite reazioni allo stato solido o metodi idrotermali. L'obiettivo è ottenere polveri con dimensioni di particella e purezza ottimali per massimizzare le prestazioni elettrochimiche.
- **Fabbricazione dell'Elettrodo:** il materiale attivo viene miscelato con additivi conduttivi e leganti per creare una *slurry*, successivamente spalmata su un collettore di corrente (in genere alluminio). La fase di essiccazione e calandratura assicura che l'elettrodo raggiunga lo spessore e la densità desiderati.
- **Assemblaggio della Cella:** gli elettrodi, separatore ed elettrolita vengono combinati sotto stretto controllo ambientale per evitare contaminazioni. La cella può assumere formati cilindrici, prismatici o a sacchetto (pouch), in base alle necessità applicative.
- **Formazione e Invecchiamento:** le celle assemblate subiscono cicli iniziali di carica/scarica per stabilizzare l'interfaccia elettrolita-elettrodo (SEI). In seguito, un periodo di invecchiamento (*aging*) consente di verificare uniformità e affidabilità delle prestazioni (Zhang et al., 2023).

Ogni passaggio richiede un controllo accurato dei parametri di processo per garantire la qualità e la performance finale dell'accumulatore LFP.

Applicazioni

Grazie alle doti di sicurezza, longevità e convenienza economica, le batterie LFP trovano impiego in settori in cui la densità energetica non costituisce la priorità principale. Nell'industria automotive, vengono spesso adottate per alimentare autobus elettrici e veicoli di fascia media o bassa, soprattutto in Cina, dove la tecnologia LFP domina il mercato EV. Inoltre, la loro stabilità termica e la lunga vita operativa ne fanno una scelta ideale per sistemi di accumulo stazionari, in grado di supportare la stabilità della rete elettrica e l'integrazione di fonti rinnovabili (Wikipedia).

Considerazioni Ambientali ed Economiche

L'uso di materiali comuni e non tossici come ferro e fosfato contribuisce a ridurre l'impatto ambientale rispetto a batterie contenenti cobalto o nichel. Inoltre, i processi di fabbricazione delle celle LFP risultano relativamente semplici e scalabili, con costi di produzione spesso inferiori rispetto ad altre chimiche agli ioni di litio. Questi aspetti, uniti alla lunga durata operativa, migliorano la sostenibilità complessiva del sistema e ne rafforzano la competitività sul mercato (Springer Link).

Sviluppi Futuri

La ricerca più recente si concentra sul miglioramento della densità energetica delle batterie LFP tramite l'adozione di soluzioni come la nanostrutturazione o il *doping* con elementi in grado di aumentare la conduttività e la stabilità chimica. Innovazioni nell'ingegneria degli elettrodi, come le strutture core-shell, e l'introduzione di elettroliti avanzati o allo stato solido mirano a espandere ulteriormente lo spettro applicativo di questa tecnologia (MDPI).

Conclusioni

Le batterie LFP rappresentano una soluzione bilanciata tra sicurezza, longevità e costi competitivi, trovando una collocazione ideale in applicazioni in cui questi fattori risultano prioritari rispetto alla massima densità energetica. L'elevata stabilità termica e il prolungato ciclo di vita ne sottolineano il potenziale in campo automobilistico e nei sistemi di accumulo stazionario. Al contempo, lo sviluppo continuo di nuove tecniche di progettazione e di materiali avanzati lascia intravedere ulteriori progressi in termini di prestazioni ed efficienza, consolidando il ruolo delle batterie LFP nel futuro dell'accumulo energetico.

I supercondensatori ibridi, talvolta chiamati *supercapabattery* o *supercapattery* a seconda del se prevalgono le caratteristiche tipiche delle batterie o dei supercondensatori tradizionali (Figura 4, Figura 5), rappresentano una delle innovazioni più promettenti nel campo dell'accumulo energetico. Questi dispositivi nascono dall'esigenza di coniugare le qualità distintive di due tecnologie tradizionalmente opposte: da un lato, i supercondensatori convenzionali, noti per la loro rapidità di risposta e l'elevata densità di potenza, e dall'altro, le batterie (in particolare quelle agli ioni di litio), che si distinguono per una densità energetica significativamente più alta. La combinazione di questi due approcci permette di sviluppare sistemi energetici in grado di rispondere efficacemente a numerosi requisiti applicativi, garantendo performance che spaziano dall'uso in applicazioni ad alta intensità di potenza fino allo stoccaggio prolungato di energia.

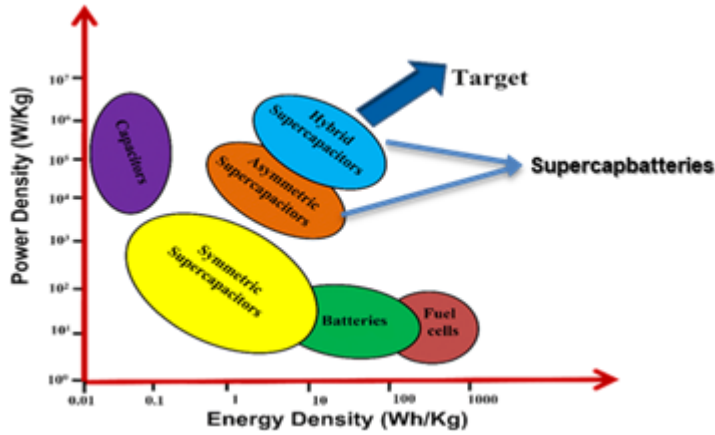


Figura 4 Grafico di Ragone per indicare dove si posizionano i supercondensatori e HSC

Il principio operativo dei supercondensatori ibridi si basa sull'integrazione di processi elettrochimici tipici dei dispositivi a doppio strato (EDLC) con reazioni redox paragonabili a quelle osservate nelle batterie agli ioni di litio. In particolare, l'adozione di anodi in grafite drogata con litio in combinazione con catodi costituiti da materiali a base di carbonio attivato ha consentito di ottenere un'interfaccia elettrochimica ottimizzata, capace di sfruttare sia il rapido accumulo di carica tipico degli EDLC che il contributo faradaico, elemento cruciale per l'incremento della densità energetica (Smith, 2020). Questo approccio ibrido non solo supera le limitazioni imposte dai singoli sistemi tradizionali, ma apre anche la strada a nuove soluzioni per applicazioni emergenti nei settori dell'energia rinnovabile, della mobilità elettrica e dei sistemi di backup energetico.

Device	Supercapattery (Supercabattery)					
	Supercapacitor			Hybrid		Battery
	EDLC	Pseudocapacitor				
	NFCS	NFCS	CFS	NFCS	CFS	NCFS
Electrode Material	+	+	+	+	+	+
	NFCS	CFS	CFS	NCFS	NCFS	NCFS
Specific energy (Wh kg ⁻¹)	6.7 [15], 10.2 [16]	3.6 [17], 14.3 [18]	26.6 [19]	204 [21], 230 [5]	103 [22], 114 [8]	250 [23]
Max specific power (kW kg ⁻¹)	111.6 [15]	24.7 [17], 0.68 [18]	13 [19]	55 [21]	56 [22]	1.5 [23]
Cycling life (cycles)	>10,000 [16]	>5,000 [17]	>5000 [19, 20]	>1000 [21]	>1000 [22]	<1200 [23]

Figura 5 Principale suddivisione degli EES

Ulteriori studi sperimentali hanno evidenziato come la sinergia fra materiali compositi e nanostrutturati possa determinare una riduzione significativa delle perdite interne e una maggiore efficienza nella gestione della carica,

rendendo questi sistemi particolarmente adatti per applicazioni dove la rapidità di risposta e l'affidabilità operativa sono indispensabili (Liu, 2021). Oltre agli aspetti tecnologici, si è registrato un crescente interesse nell'ottimizzazione dei processi produttivi, volto a ridurre i costi di realizzazione e a garantire la stabilità dei materiali nel lungo termine, elementi fondamentali per la diffusione su larga scala di tali dispositivi.

Il confronto tra supercondensatori ibridi e batterie agli ioni di litio si fonda su diverse metriche prestazionali che includono la densità energetica, la densità di potenza, la durata operativa in termini di cicli di carica/scarica e i tempi di ricarica. Queste variabili sono essenziali per definire l'idoneità del dispositivo in contesti applicativi specifici.

Le batterie agli ioni di litio sono tradizionalmente celebrate per la loro elevata densità energetica, che consente di immagazzinare quantità considerevoli di energia in volumi e pesi ridotti. Tuttavia, questo vantaggio è accompagnato da limitazioni in termini di rapidità di erogazione e cicli di vita operativa. I supercondensatori ibridi, pur non raggiungendo il picco prestazionale delle batterie in termini di energia stoccata, riescono a colmare in parte il divario grazie all'integrazione di processi redox. Studi condotti da Wang (2020) hanno mostrato come l'impiego di materiali ibridi possa portare a una densità energetica incrementata fino a valori comparabili con quelli di alcune batterie di nuova generazione, pur mantenendo un'elevata efficienza energetica. Tale risultato si ottiene attraverso la combinazione di strutture porose e reazioni elettrochimiche controllate che aumentano la capacità di immagazzinamento senza compromettere la velocità di risposta del dispositivo.

Inoltre, la ricerca nel campo dei materiali innovativi ha permesso di individuare soluzioni che utilizzano nanomateriali e compositi ibridi, capaci di migliorare ulteriormente le prestazioni energetiche attraverso una migliore gestione dei processi di adsorbimento e reazione elettrochimica (Smith, 2020). Questi risultati sono di particolare interesse per applicazioni dove la compattezza e l'efficienza energetica sono fattori critici, come nei sistemi portatili e nelle applicazioni militari.

La densità di potenza rappresenta un parametro fondamentale per la capacità di un dispositivo di erogare energia in tempi estremamente brevi. I supercondensatori ibridi si distinguono per la loro abilità di fornire rapidamente impulsi di potenza, caratteristica essenziale per applicazioni come la frenata rigenerativa nei veicoli elettrici e il supporto alle reti elettriche in condizioni di picco. Le ricerche di Chen (2020) evidenziano come la riduzione della resistenza interna e l'ottimizzazione della geometria degli elettrodi possano portare a valori di densità di potenza superiori rispetto a quelli ottenuti con le batterie agli ioni di litio. Questo vantaggio rende i supercondensatori ibridi particolarmente utili in scenari in cui la velocità di risposta e la capacità di erogare energia in maniera istantanea sono essenziali.

Inoltre, la flessibilità progettuale dei supercondensatori ibridi consente l'adozione di architetture innovative che massimizzano la superficie attiva degli elettrodi, contribuendo a una maggiore efficienza nell'erogazione dell'energia. Tale caratteristica è particolarmente importante in ambiti industriali e nei sistemi di accumulo distribuito, dove la gestione dinamica del carico è una necessità crescente (Chen, 2020).

Uno dei principali vantaggi dei supercondensatori ibridi, in particolare della sottocategoria *supercabattery*, risiede nella loro eccezionale durata operativa. A differenza delle batterie agli ioni di litio, che tendono a subire un degrado progressivo della capacità dopo un numero limitato di cicli di carica/scarica, i supercondensatori ibridi possono garantire prestazioni stabili per decine di migliaia di cicli. Questo aspetto è di fondamentale importanza in applicazioni che richiedono una lunga durata e una manutenzione ridotta, come nei sistemi di backup per infrastrutture critiche e nelle reti di distribuzione energetica (Lee, 2019).

Il miglioramento della durata operativa è dovuto, in parte, alla natura dei processi elettrochimici impiegati: mentre i meccanismi redox possono comportare una certa usura nel tempo, la presenza simultanea di meccanismi di accumulo elettrostatico contribuisce a ridurre lo stress elettrochimico sui materiali. Inoltre, l'uso di materiali nanostrutturati e di rivestimenti protettivi ha permesso di mitigare gli effetti del degrado, garantendo una stabilità ciclica superiore e una minore perdita di capacità nel tempo. Questi sviluppi sono stati documentati in numerosi studi sperimentali, che hanno confrontato direttamente le prestazioni dei supercondensatori ibridi con quelle delle batterie agli ioni di litio, evidenziando un netto vantaggio in termini di ciclo di vita (Lee, 2019).

La rapidità di ricarica è un'altra caratteristica distintiva dei supercondensatori ibridi. Grazie alla bassa resistenza interna e alla struttura elettrochimica ottimizzata, questi dispositivi sono in grado di ricaricarsi in tempi estremamente ridotti, spesso nell'ordine di pochi minuti, a patto di essere mantenuti a temperature al di sotto dei 35°C. Al contrario, le batterie agli ioni di litio richiedono tempi di ricarica significativamente più lunghi, che possono variare da decine di minuti a diverse ore, in base alla capacità e alla chimica adottata (Garcia, 2022). Questa differenza è particolarmente rilevante in applicazioni dove il tempo di inattività deve essere minimizzato, come nei sistemi di emergenza o nei dispositivi mobili ad alte prestazioni.

La capacità di ricarica rapida non solo migliora l'efficienza operativa dei dispositivi, ma riduce anche i costi legati alla gestione e alla manutenzione dei sistemi di accumulo. La possibilità di effettuare ricariche rapide consente infatti di aumentare il numero di cicli operativi giornalieri, contribuendo a una maggiore produttività e a una migliore gestione dell'energia in tempo reale (Garcia, 2022).

I supercondensatori tradizionali, basati esclusivamente sul principio del doppio strato elettrochimico, sono noti per la loro semplicità costruttiva e la capacità di fornire energia in tempi brevissimi. Tuttavia, una limitazione fondamentale di tali dispositivi è rappresentata dalla bassa densità energetica, che ne restringe l'utilizzo in contesti dove è richiesto uno stoccaggio energetico a lungo termine. I supercondensatori ibridi sono stati sviluppati per superare questa criticità, integrando strategie di accumulo redox che permettono un incremento significativo della capacità energetica senza compromettere la velocità di erogazione della potenza.

In pratica, l'adozione di materiali compositi e la progettazione di elettrodi ibridi hanno portato a una marcata evoluzione delle prestazioni dei sistemi di accumulo. Ad esempio, l'impiego di anodi in grafite drogata con grafene consente di ottenere una maggiore interazione tra le fasi elettrochimiche e una migliore distribuzione della carica. Tale configurazione, studiata in dettaglio da Wang (2020), risulta particolarmente efficace nel ridurre le perdite energetiche e nel garantire un equilibrio ottimale tra densità di potenza e densità energetica. Di conseguenza, i supercondensatori ibridi si configurano come una soluzione tecnologica avanzata, capace di integrare in modo efficace i vantaggi dei sistemi EDLC con quelli offerti dalle batterie, aprendo nuove prospettive per applicazioni in cui la rapidità di risposta e l'efficienza energetica sono essenziali.

La revisione della letteratura ha messo in evidenza che l'integrazione di processi redox con l'accumulo elettrostatico non solo incrementa la densità energetica, ma migliora anche l'efficienza operativa complessiva, garantendo al contempo una risposta quasi istantanea alle variazioni di carico.

Nell'analisi sono stati approfonditi i meccanismi di accumulo dell'energia, che coinvolgono la formazione di un doppio strato elettrico e la partecipazione attiva di reazioni elettrochimiche. Questo approccio consente di sfruttare al massimo le proprietà dei materiali impiegati, come i polimeri conduttivi, i nanocompositi e i materiali carboniosi avanzati, che offrono un'elevata area superficiale e una struttura porosa ideale per la diffusione degli ioni. Tali caratteristiche sono state documentate in vari studi sperimentali e di simulazione, che hanno evidenziato come la progettazione degli elettrodi ibridi possa essere ulteriormente ottimizzata per ridurre i tempi di risposta e aumentare l'efficienza del trasferimento di carica (Liu, 2021).

Inoltre, l'approfondimento teorico e sperimentale ha permesso di classificare i supercondensatori ibridi in diverse tipologie, distinguendo tra dispositivi a elettrodi asimmetrici e quelli che impiegano configurazioni simmetriche ma con materiali compositi. Tale classificazione ha rilevato differenze sostanziali nella configurazione strutturale e nelle prestazioni elettrochimiche, offrendo un panorama completo delle possibili soluzioni tecnologiche adottabili. La letteratura scientifica attuale, reperibile in banche dati, fornisce numerosi esempi di applicazioni reali e prototipi sperimentali che testimoniano il potenziale di queste tecnologie per l'implementazione in sistemi energetici di nuova generazione (Smith, 2020).

I supercondensatori ibridi offrono un potenziale trasformativo nel panorama dell'accumulo energetico, non solo per le loro prestazioni tecniche, ma anche per la loro capacità di integrare in modo flessibile differenti modalità di stoccaggio dell'energia. La loro rapida erogazione di potenza, combinata con una densità energetica migliorata rispetto ai tradizionali dispositivi EDLC, li rende particolarmente adatti per applicazioni dinamiche e ad alta intensità, come la frenata rigenerativa nei veicoli elettrici, il supporto alle reti elettriche durante i picchi di domanda e l'uso in sistemi di energia rinnovabile che richiedono un rapido bilanciamento del carico.

Tuttavia, nonostante questi evidenti vantaggi, permangono diverse sfide che ne limitano l'adozione su larga scala. Tra queste, spiccano i costi elevati legati all'impiego di materiali avanzati e alle complesse tecnologie di produzione, nonché la necessità di garantire una stabilità operativa prolungata anche in condizioni ambientali e operative estreme. La ricerca attuale si concentra su percorsi innovativi per superare tali limitazioni, includendo lo sviluppo di nuovi materiali, l'ottimizzazione dei processi di deposizione dei rivestimenti protettivi e l'impiego di tecniche di ingegneria dei materiali che favoriscano una migliore integrazione tra le componenti elettrochimiche (Garcia, 2022).

Un ulteriore aspetto di rilievo riguarda l'integrazione dei supercondensatori ibridi con altre tecnologie di accumulo energetico, come le batterie allo stato solido e i sistemi ibridi multi-energia. Questa convergenza tecnologica potrebbe portare alla realizzazione di soluzioni altamente efficienti e modulari, in grado di rispondere in maniera dinamica alle esigenze di una rete elettrica sempre più decentralizzata e interconnessa. In particolare, l'approccio integrato

permetterebbe di sfruttare le caratteristiche complementari dei diversi sistemi, massimizzando la capacità di stoccaggio complessiva e migliorando la resilienza dell'infrastruttura energetica.

Nel lungo termine, lo sviluppo dei supercondensatori ibridi potrebbe contribuire in maniera decisiva alla transizione verso un sistema energetico sostenibile, riducendo l'impatto ambientale e migliorando l'efficienza complessiva dei processi di accumulo e distribuzione dell'energia. Le prospettive future, quindi, sono strettamente legate alla capacità di innovare non solo a livello di materiali, ma anche nell'ottimizzazione dei processi produttivi e nell'integrazione di sistemi energetici ibridi che possano adattarsi alle mutevoli esigenze del mercato e dell'ambiente (Chen, 2020).

In conclusione, i supercondensatori ibridi rappresentano una tecnologia emergente con un potenziale significativo per rivoluzionare il settore dell'accumulo energetico. Attraverso continui sforzi di ricerca e sviluppo, finalizzati all'ottimizzazione dei materiali e dei processi costruttivi, è possibile prevedere una futura implementazione su larga scala, capace di coniugare efficienza, affidabilità e sostenibilità ambientale. Le evidenze scientifiche attuali suggeriscono che l'integrazione di approcci multidisciplinari, che spaziano dalla chimica dei materiali all'ingegneria elettrica, sarà fondamentale per superare le attuali limitazioni e per realizzare sistemi energetici all'avanguardia, in grado di rispondere alle crescenti sfide del mondo moderno (Liu, 2021; Smith, 2020).

Obiettivi e Metodologia della Ricerca

La transizione verso una mobilità sostenibile e l'integrazione di sistemi di accumulo energetico avanzati rappresentano tematiche di primaria importanza per lo sviluppo di soluzioni tecnologiche all'avanguardia. In questo contesto, la presente ricerca si propone di analizzare e sviluppare nuovi sistemi per la power unit destinati alla micromobilità, focalizzandosi in particolare sull'impiego di tecnologie ibride capaci di integrare le qualità dei supercondensatori con quelle delle batterie tradizionali. Tale approccio intende superare le limitazioni riscontrate nei sistemi convenzionali quali problematiche legate alla gestione termica, alla sicurezza operativa e alla sostenibilità ambientale offrendo al contempo soluzioni in grado di garantire prestazioni elevate, rapidità di ricarica e una lunga durata operativa.

Il presente capitolo espone in maniera dettagliata gli obiettivi della ricerca e la metodologia sperimentale adottata per il loro conseguimento, illustrando le ragioni alla base della scelta dell'approccio sperimentale e descrivendo nel dettaglio le collaborazioni e le risorse impiegate nel progetto. La trattazione si suddivide in tre macro-sezioni: la prima si focalizza sugli obiettivi principali, la seconda descrive i metodi di ricerca e l'approccio sperimentale, mentre la terza evidenzia le collaborazioni e le risorse utilizzate per la realizzazione dello studio.

La crescente domanda di soluzioni di micromobilità, unitamente alle esigenze di riduzione delle emissioni e di ottimizzazione dell'efficienza energetica, ha condotto alla necessità di ripensare i sistemi di accumulo tradizionali. Le batterie agli ioni di litio, pur rappresentando lo standard tecnologico attuale, presentano criticità inerenti alla gestione termica, alla sicurezza e alla sostenibilità ambientale, dovute in gran parte all'impiego di materiali rari e alla complessità dei processi di riciclo (Commissione Europea, 2020; Consiglio dell'Unione Europea, 2020). In questo scenario, l'introduzione di supercondensatori ibridi – che uniscono un'elevata densità di potenza e tempi di ricarica estremamente rapidi a una densità energetica in crescita – emerge come una prospettiva innovativa per la micromobilità urbana (Zhang, Wei, & Zhang, 2021; Egbue & Long, 2012). Studi recenti, ad esempio, hanno evidenziato come la combinazione di materiali compositi e di tecniche avanzate di fabbricazione possa incrementare la densità energetica dei supercondensatori, rendendoli competitivi rispetto alle tecnologie convenzionali (Wang et al., 2017; Kang et al., 2020).

Alla luce di tali considerazioni, la ricerca si propone di coniugare innovazione tecnologica e sostenibilità ambientale, perseguendo due filoni di sviluppo complementari:

- **Sviluppo di accumulatori a condensatori ibridi avanzati:** Sfruttare le proprietà intrinseche dei supercondensatori ibridi per realizzare dispositivi in grado di fornire risposte energetiche rapide e affidabili, integrabili nei sistemi di accumulo per microveicoli.
- **Ottimizzazione del ciclo di vita e sicurezza:** Valutare e migliorare gli aspetti legati alla gestione termica, alla durata ciclica e alla sostenibilità ambientale dei nuovi accumulatori, confrontando le prestazioni con quelle dei sistemi tradizionali.

L'obiettivo generale della ricerca è lo sviluppo e la validazione di un nuovo sistema di accumulo energetico per microveicoli, che dovrà garantire:

- **Ridotti tempi di ricarica:** Possibilità di una ricarica rapida, con benefici in termini di gestione della flotta e riduzione dei tempi di inattività.
- **Lunga durata operativa:** Prolungamento del ciclo di vita mediante l'adozione di tecnologie avanzate, con conseguente riduzione dei costi di sostituzione e manutenzione.
- **Sostenibilità ambientale:** la lunga vita operativa allunga la vita del mezzo garantendo così una carbon footprint minore.

Per raggiungere l'obiettivo generale, la ricerca è stata strutturata in diverse fasi, ognuna delle quali affronta aspetti fondamentali per lo sviluppo di un innovativo sistema di accumulo ibrido. Inizialmente, si procederà con la progettazione e la simulazione del sistema, dedicando particolare attenzione a un'analisi comparativa dei parametri energetici e delle prestazioni offerte dai supercondensatori ibridi rispetto alle batterie convenzionali, come evidenziato in studi recenti (Manthiram, 2020; Goodenough & Park, 2013). Contestualmente, verranno elaborati modelli matematici e simulativi capaci di prevedere il comportamento elettrico e termico del sistema in condizioni operative reali, sfruttando anche tecniche di ottimizzazione predittiva per affinare le prestazioni (Li et al., 2020; Kang et al., 2020).

Successivamente, la fase di sviluppo sperimentale e prototipazione prevede la realizzazione di modelli funzionali che integrino il nuovo sistema di accumulo. In questa fase, sarà fondamentale modulare la capacità e gestire adeguatamente il calore prodotto, al fine di garantire un funzionamento efficiente e sicuro. I prototipi saranno sottoposti a rigorosi test di laboratorio per caratterizzarne le prestazioni elettrochimiche e meccaniche, impiegando tecniche avanzate come la spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS) e l'analisi in regime dinamico (Zhang et al., 2021; Wang et al., 2017).

Una volta ottenuti i dati sperimentali, l'attenzione si sposterà sulla validazione del sistema. Verranno eseguiti cicli prolungati di carica-scarica per valutare la stabilità e la durata operativa, oltre a condurre confronti diretti con le prestazioni delle tradizionali batterie agli ioni di litio, soprattutto in termini di densità di potenza, sicurezza e sostenibilità ambientale.

In un'ulteriore fase, la ricerca si concentrerà sull'ottimizzazione dell'integrazione del sistema ibrido nei microveicoli. Sarà studiato in dettaglio come il nuovo sistema si adatti ai requisiti di dimensionamento, distribuzione termica e gestione del carico, assicurando che l'innovazione tecnologica si traduca in vantaggi concreti nell'ambito della mobilità.

Infine, verrà effettuata un'analisi approfondita del ciclo di vita e della sostenibilità ambientale del sistema, valutando gli impatti lungo tutte le fasi, dalla produzione allo smaltimento, nel rispetto delle normative europee vigenti (Commissione Europea, 2020; Consiglio dell'Unione Europea, 2020). Tale analisi porterà alla definizione di linee guida specifiche per il riciclo e la gestione sostenibile dei componenti, assicurando che l'innovazione tecnologica sia accompagnata da una consapevole responsabilità ambientale.

Il successo del progetto non solo rappresenterebbe un progresso tecnologico, ma apporterebbe benefici concreti anche sul piano applicativo. Innanzitutto, l'introduzione di un sistema di accumulo ibrido segnerebbe un passo decisivo nell'innovazione tecnologica, superando le limitazioni delle soluzioni tradizionali e offrendo prestazioni superiori in termini di potenza, durata e rapidità di ricarica. Questo avanzamento consentirebbe, infatti, di ottenere sistemi energetici più efficienti e di ridurre significativamente i tempi di inattività.

Parallelamente, l'approccio adottato contribuirebbe a generare impatti ambientali positivi: l'impiego di materiali più sostenibili e l'ottimizzazione del ciclo di vita degli accumulatori si tradurrebbero in una significativa riduzione dell'impatto ambientale. Tale strategia favorirebbe, inoltre, la transizione verso soluzioni energetiche più ecologiche nel settore della micromobilità.

Un ulteriore vantaggio si riscontra sul fronte economico e competitivo. Un sistema di accumulo che garantisca maggiore efficienza e durata permetterebbe di abbattere i costi operativi e di manutenzione, rafforzando così la competitività dei microveicoli sul mercato. In altre parole, una tecnologia più avanzata non solo migliorerebbe le performance tecniche, ma offrirebbe anche un concreto risparmio economico per gli operatori.

Infine, un aspetto fondamentale riguarda la sicurezza: l'adozione di tecnologie innovative per la gestione termica e la protezione contro il surriscaldamento contribuirebbe a mitigare i rischi associati ai sistemi di accumulo, garantendo una maggiore protezione per gli utenti.

Questi benefici, presi nel loro complesso, rispondono in maniera completa alle sfide poste dalla diffusione crescente dei microveicoli elettrici, combinando efficienza energetica, sicurezza operativa e sostenibilità ambientale, come confermato anche dagli studi di Egbue & Long (2012) e Manthiram (2020).

La metodologia adottata si fonda su un approccio integrato, che combina tecniche sperimentali, modellizzazione matematica e simulazioni numeriche per fornire una valutazione completa del sistema di accumulo ibrido. L'approccio multidisciplinare consente di affrontare il problema da diverse prospettive: dalla caratterizzazione elettrochimica e meccanica fino alla validazione delle performance in condizioni operative reali.

In particolare, la ricerca si articola in due filoni complementari:

- **Filone sperimentale:** Realizzazione di test di laboratorio e prototipi funzionali per la raccolta di dati empirici e per la verifica delle prestazioni energetiche e termiche.
- **Filone teorico-simulativo:** Sviluppo di modelli matematici e simulazioni per prevedere il comportamento del sistema e ottimizzare i parametri di progetto.

Questo duplice approccio consente di correlare i dati sperimentali con i risultati delle simulazioni, garantendo così un'analisi approfondita e una validazione incrociata dei risultati ottenuti (Zhang et al., 2021; Li et al., 2020).

La fase sperimentale è articolata in diversi step, ciascuno finalizzato a caratterizzare aspetti specifici del sistema.

Per valutare le prestazioni sono state adottate le seguenti tecniche:

- **Spettroscopia di Impedenza Elettrochimica (EIS):** Questa tecnica consente di analizzare la risposta in frequenza del sistema, evidenziando la resistenza interna, la capacità di carico e le dinamiche del trasferimento ionico. I dati ottenuti sono fondamentali per la calibrazione dei modelli matematici e per identificare eventuali criticità nella gestione termica (Goodenough & Park, 2013).
- **Test di carica-scarica a cicli ripetuti:** Questi test permettono di valutare la stabilità e la durata operativa del sistema, quantificando il degrado delle performance nel tempo e identificando i parametri ottimali per la gestione del ciclo di vita degli accumulatori (Manthiram, 2020).
- **Test meccanici:** Questi test valutano la resistenza strutturale e la robustezza dei componenti, assicurando che l'integrazione nei microveicoli non comprometta la stabilità meccanica degli accumulatori. Le prove includono test di vibrazione (Egbue & Long, 2012).

Uno degli aspetti distintivi della presente ricerca è l'adozione di un approccio metodologico innovativo che integra sinergicamente dati sperimentali e simulazioni numeriche:

- **Integrazione di tecniche multi-scala:** Lo studio combina analisi a livello macroscopico (test meccanici e termici) con metodologie di modellizzazione a scala microscopica (analisi dei processi elettrochimici e di diffusione), offrendo una visione complessiva del comportamento del sistema.
- **Uso di algoritmi di intelligenza artificiale:** Tecniche di machine learning sono state implementate per ottimizzare in tempo reale il ciclo di carica-scarica, adattandosi alle variazioni delle condizioni operative e migliorando l'efficienza complessiva del sistema (Laschi et al., 2023).
- **Validazione in ambienti simulati e reali:** La validazione del sistema è stata effettuata sia in laboratorio sia in ambienti simulati, riproducendo le condizioni operative tipiche di un microveicolo, garantendo così la robustezza dei risultati e ne accrescendo l'applicabilità pratica.

Il trasferimento tecnologico e l'applicazione pratica dei risultati sono stati facilitati da solide collaborazioni con imprese del settore:

- **Aziende produttrici di supercondensatori ibridi:** La collaborazione con aziende ha permesso l'accesso a componenti e a datasheet tecnici fondamentali per la modellizzazione e la validazione dei prototipi. In particolare, si citano DongGuan GongHe Electronics e Shenzhen Yukun Technology Co., Ltd.
- **Partner nel settore della micromobilità:** F&N e compositi srls. ha collaborato alla realizzazione dei vari veicoli coinvolti nei progetti Life2M e Leonardo. Silidea srl. invece ha collaborato alla realizzazione dei BMS degli accumulatori e Project vending per la realizzazione dei primi sistemi di raffreddamento.

La ricerca è stata resa possibile grazie a un supporto in termini di risorse strumentali e finanziarie:

- **Laboratori:** L'utilizzo di laboratori dotati di impedenziometri, macchine per test meccanici e ambienti di simulazione computerizzata ha garantito la raccolta di dati di alta qualità.
- **Finanziamenti e bandi di ricerca:** Il progetto ha ricevuto supporto finanziario da enti nazionali ed europei, quali il Programma Operativo Nazionale (PON) e fondi dedicati alla transizione ecologica e alla mobilità sostenibile (Commissione Europea, 2020).
- **Strumenti software:** L'adozione di software avanzati per l'analisi dei dati dalle campagne di misura elettrochimica, termica e meccanica ha consentito di integrare i dati sperimentali con modelli predittivi, migliorando la comprensione dei fenomeni osservati.

La ricerca si è basata su un'ampia revisione della letteratura scientifica e su studi di riferimento, che hanno fornito il quadro teorico e metodologico per l'ideazione del progetto. Tra le fonti più rilevanti si citano studi sul comportamento delle batterie agli ioni di litio, meccanismi di degradazione e ricerche relative allo sviluppo dei supercondensatori ibridi (Manthiram, 2020; Goodenough & Park, 2013; Egbue & Long, 2012; Zhang et al., 2021; UniPD, 2020). Ulteriori analisi comparate e modelli di simulazione elettrochimica e termica, tratti da articoli pubblicati su riviste internazionali di *ScienceDirect* e simili, hanno contribuito a validare il nuovo sistema di accumulo (Li et al., 2020; Kang et al., 2020).

Il presente capitolo ha illustrato in maniera dettagliata gli obiettivi e la metodologia della ricerca, ponendo le basi per lo sviluppo di un sistema di accumulo energetico ibrido destinato alla micromobilità. La definizione degli obiettivi principali ha permesso di identificare le aree chiave su cui concentrare gli sforzi, dalla progettazione e simulazione del sistema, alla sua validazione sperimentale, fino all'ottimizzazione dell'integrazione nei microveicoli. L'approccio sperimentale, integrato con modelli matematici e simulazioni numeriche, ha consentito di approfondire i fenomeni fisici e termici alla base del comportamento del sistema, fornendo un quadro completo delle sue potenzialità e dei limiti attuali.

L'importanza delle collaborazioni, sia a livello accademico che industriale, e il supporto delle risorse strumentali e finanziarie sono stati determinanti per la solidità e l'innovatività del progetto. L'integrazione di tecniche multi-scala e l'uso di algoritmi di intelligenza artificiale rappresentano un passo decisivo verso lo sviluppo di sistemi di accumulo energetico intelligenti, capaci di rispondere in maniera dinamica alle esigenze di una mobilità urbana sostenibile.

L'evoluzione dei sistemi ibridi per l'accumulo energetico apre numerose prospettive di ricerca e sviluppo:

- **Ulteriori ottimizzazioni dei materiali:** La continua ricerca su materiali avanzati, quali grafene e nanocompositi, potrà ulteriormente migliorare le prestazioni energetiche e la durata operativa dei dispositivi, riducendo contemporaneamente l'impatto ambientale.
- **Integrazione con sistemi di controllo predittivo:** L'adozione di algoritmi di intelligenza artificiale e machine learning, in grado di monitorare in tempo reale le condizioni operative e regolare dinamicamente i parametri del sistema, promette di massimizzare l'efficienza complessiva e prolungare il ciclo di vita degli accumulatori.
- **Applicazioni trasversali:** I risultati ottenuti nel contesto della micromobilità potrebbero essere estesi ad altri ambiti applicativi, come la gestione di reti di accumulo distribuito per fonti rinnovabili o l'ottimizzazione di sistemi di backup energetico in ambito industriale.
- **Standardizzazione e normative:** Il consolidamento di tecnologie innovative richiederà l'adozione di standard e normative che ne regolamentino l'uso, garantendo sicurezza e facilitando il trasferimento tecnologico nei processi industriali.

In conclusione, il presente lavoro di ricerca costituisce un contributo significativo allo sviluppo di soluzioni energetiche innovative, capaci di rispondere alle sfide poste dalla mobilità sostenibile e dalla crescente domanda di sistemi di accumulo ad alte prestazioni. Il percorso intrapreso, basato su un approccio integrato e multidisciplinare, dimostra come l'interazione tra ricerca accademica e applicazioni industriali possa generare innovazioni capaci di incidere positivamente sull'efficienza energetica e sulla sostenibilità ambientale.

Caratterizzazione delle Celle Innovative

Il crescente fabbisogno di sistemi energetici affidabili e sostenibili, unito alla diffusione della micromobilità urbana, ha stimolato la ricerca verso tecnologie di accumulo avanzate in grado di rispondere in maniera dinamica a condizioni operative sempre più complesse. In questo contesto, le celle innovative oggetto di questo studio rappresentano una risposta tecnologica promettente, capace di integrare prestazioni elettriche e meccaniche superiori rispetto alle tradizionali celle agli ioni di litio. L'obiettivo di questo capitolo è quello di presentare in maniera dettagliata le metodologie adottate per la caratterizzazione di tali celle, includendo sia aspetti sperimentali che di modellizzazione, nonché di discutere le implicazioni dei risultati ottenuti in funzione delle applicazioni future.

L'approccio multidisciplinare adottato prevede l'impiego di tecniche avanzate di spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS), analisi in dominio del tempo e test meccanici su piattaforme dedicate. Questi strumenti consentono di approfondire la comprensione dei meccanismi interni che regolano il trasferimento di ioni, la formazione della doppia carica elettrica agli elettrodi e la risposta strutturale alle sollecitazioni meccaniche, fornendo un quadro esaustivo delle potenzialità delle celle innovative.

Il presente capitolo si inserisce in un filone di ricerca che, da anni, si dedica allo sviluppo di soluzioni energetiche di nuova generazione, in grado di garantire maggiore sicurezza, durata e sostenibilità ambientale. Numerosi studi recenti (ad es., Corti et al., 2021; Lozito et al., 2024; Catelani et al., 2023) hanno evidenziato come l'integrazione di nuovi materiali e metodologie di analisi possa condurre a una significativa riduzione della resistenza interna e a una migliore gestione termica e meccanica dei dispositivi di accumulo. In questo scenario, la presente dissertazione offre un contributo originale attraverso l'analisi comparativa con le celle agli ioni di litio e la proposta di modelli predittivi in grado di supportare il dimensionamento di sistemi applicativi in ambito micromobilità e reti energetiche distribuite.

La caratterizzazione approfondita delle celle innovative richiede l'adozione di un approccio sperimentale multidisciplinare, che integri misurazioni elettriche e meccaniche condotte in condizioni controllate. In questa sezione si descrive nel dettaglio il setup sperimentale, la strumentazione impiegata e i protocolli di test, con particolare attenzione alla replicabilità e alla validità statistica dei risultati ottenuti.

La definizione di un setup sperimentale accurato costituisce il primo passo per la caratterizzazione delle celle innovative. L'apparato impiegato integra:

- **Analizzatore di impedenza elettrochimica (EIS):** è stato utilizzato un Gamry Interface 5000E, uno strumento ad alta precisione in grado di misurare la risposta in frequenza delle celle, utili per identificare eventuali difetti e degradazioni e per determinare i contributi resistivi e capacitivi. (Figure 7)
- **Camera climatica:** è stata utilizzata una LabEvent LC/150/40/5, per simulare condizioni ambientali variabili (temperatura della cella o ambiente) e valutare l'effetto di tali variabili sulle prestazioni della cella. (Figure 7)
- **Dispositivi di simulazione delle vibrazioni (shaker):** Impiegati per riprodurre le sollecitazioni meccaniche tipiche dell'ambiente di micromobilità. (Figure 6)

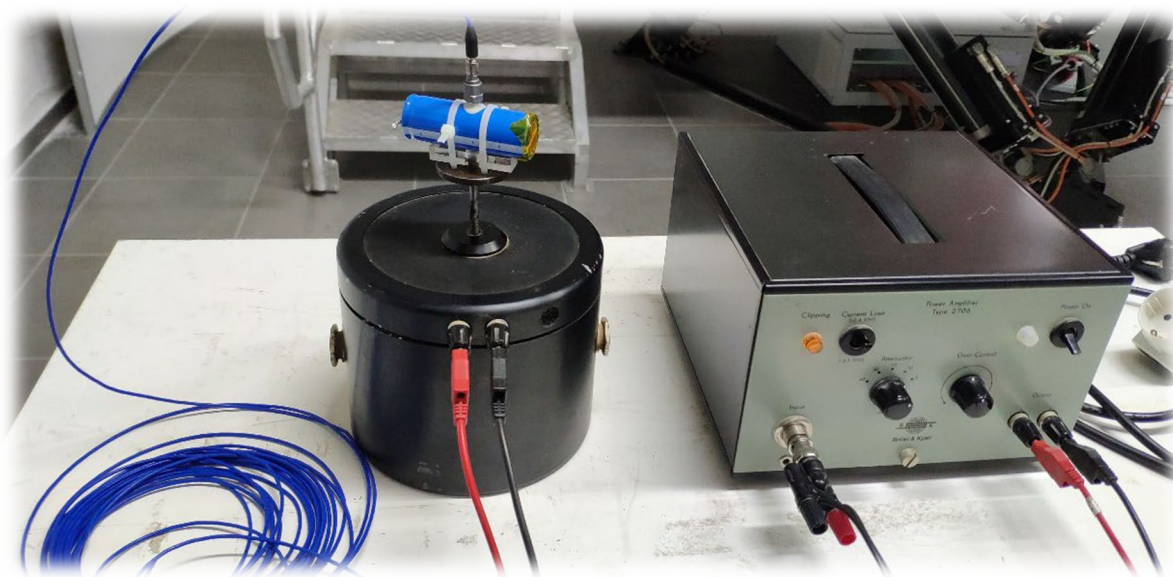


Figura 6 setup sperimentale test a vibrazioni

- **Carico elettrico, ciclatore e alimentatore:** Impiegati per simulare i cicli di carica e di scarica di una cella o di un accumulatore, e per fare alcune valutazioni di grandezze elettriche quali la resistenza interna.

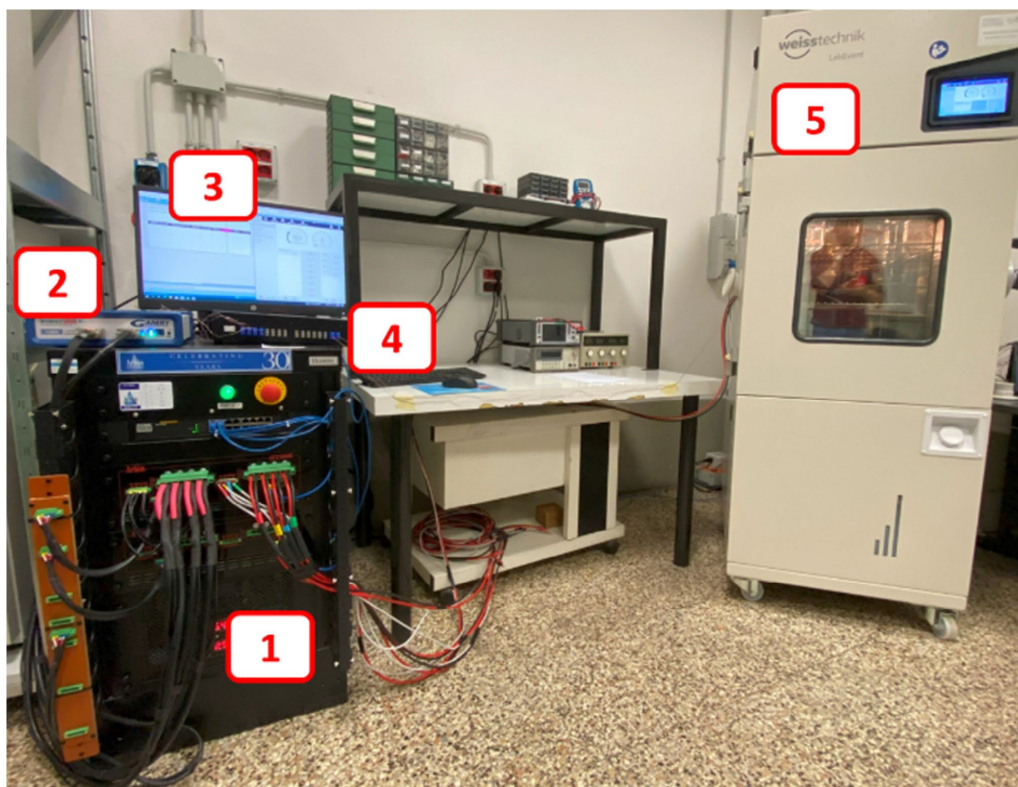


Figure 7 Setup sperimentale completo. 1: alimentatore bidirezionale. 2: strumento EIS. 3: PC. 4: datalogger. 5: Camera climatica

La scelta accurata degli strumenti consente di garantire una validità elevata dei dati sperimentali, favorendo un confronto diretto tra le misurazioni e le simulazioni matematiche. La strumentazione utilizzata è in linea con gli standard internazionali, come evidenziato da recenti studi (Corti et al., 2021; Lozito et al., 2024).

Nel corso delle misurazioni elettriche, si è optato per l'impiego di due approcci complementari, ciascuno dei quali ha permesso di cogliere aspetti differenti e fondamentali del comportamento della cella.

Il primo approccio, noto come analisi in dominio del tempo, prevede l'applicazione di impulsi di carica e scarica, permettendo di monitorare in tempo reale l'andamento di tensione e corrente. Tale metodo si è rivelato estremamente utile per evidenziare le prestazioni a breve termine della cella, facilitando l'osservazione delle risposte transitorie e la variazione del comportamento elettrico in funzione dello stato di carica (SOC). I dati raccolti in questa fase sono stati impiegati per calibrare modelli equivalenti circuitali, i quali integrano elementi dinamici capaci di riprodurre fedelmente le variazioni operative della cella in relazione al SOC (Catelani et al., 2023).

Il secondo approccio si basa sull'analisi in frequenza tramite la spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS). Variando la frequenza del segnale applicato, che si estende da valori di millihertz fino a centinaia di kilohertz, è stato possibile ottenere una visione dettagliata dei processi elettrochimici interni alla cella. In particolare, questa tecnica ha consentito di separare in maniera chiara i contributi dovuti alla resistenza, alla capacità e alla diffusione ionica, fornendo un quadro esaustivo delle dinamiche di carica e scarica, sia in condizioni stazionarie che dinamiche. L'analisi dei dati EIS ha previsto l'adozione di modelli equivalenti circuitali dotati di elementi non lineari, per garantire una rappresentazione realistica del comportamento della cella. Inoltre, l'impiego di sofisticate tecniche di ottimizzazione (tra cui algoritmi genetici e metodi "black-box" basati su reti neurali) ha permesso di evitare la convergenza verso minimi locali, assicurando così una stima precisa dei parametri del modello (Lozito et al., 2024; Catelani et al., 2023).

In sintesi, la combinazione dei due approcci analitici ha consentito di ottenere una comprensione approfondita e articolata del comportamento elettrico della cella. Tale integrazione metodologica, che unisce l'analisi in dominio del tempo alla spettroscopia EIS, si configura come uno strumento indispensabile per lo sviluppo di modelli predittivi di elevata accuratezza, fondamentali per il perfezionamento e l'ottimizzazione delle tecnologie di accumulo energetico.

Parallelamente alle analisi elettriche, si è ritenuto fondamentale approfondire la valutazione della robustezza meccanica delle celle innovative. Per ottenere un quadro completo delle prestazioni in condizioni operative reali, tipiche degli ambienti di micromobilità, sono state progettate specifiche prove meccaniche, in particolare quelle relative alle vibrazioni.

In dettaglio, le celle sono state sottoposte a cicli di vibrazione a frequenze variabili, con l'obiettivo di riprodurre le sollecitazioni meccaniche che si manifestano durante il funzionamento di veicoli a bassa e alta velocità. Le vibrazioni a bassa frequenza, infatti, sono state studiate per simulare le oscillazioni tipiche degli spostamenti urbani, consentendo di verificare la stabilità strutturale del pacco batteria in condizioni di uso quotidiano. Al contrario, le vibrazioni ad alta frequenza sono state impiegate per identificare eventuali variazioni nella risposta in impedenza dovute a stress meccanici più intensi, simili a quelli che potrebbero verificarsi in scenari di guida più dinamici.

I risultati ottenuti evidenziano che, pur essendo le celle sottoposte a sollecitazioni meccaniche, le variazioni nella risposta elettrochimica sono contenute entro i parametri di tolleranza progettuali, confermando così la resilienza del sistema e l'efficacia delle soluzioni adottate (Laschi et al., 2023).

Uno degli aspetti centrali della caratterizzazione delle celle innovative è la stretta integrazione tra dati sperimentali e modelli matematici. La modellizzazione, infatti, non solo consente di interpretare i dati in maniera accurata, ma rappresenta anche uno strumento fondamentale per la progettazione e l'ottimizzazione dei sistemi di accumulo in scenari applicativi reali.

Nel corso dello sviluppo della strategia di modellizzazione, l'adozione dei modelli equivalenti circuitali si è rivelata fondamentale per rappresentare in modo accurato le complesse dinamiche elettrochimiche delle celle. In sostanza, questi modelli sono stati progettati per integrare, in un'unica struttura, elementi resistivi e capacitivi o induttivi, al fine di riprodurre fedelmente i fenomeni osservati. Ad esempio, la presenza di resistenze variabili consente di modellare l'andamento della resistenza interna in funzione dello stato di carica e delle specifiche condizioni operative, mentre l'inclusione di capacità dipendenti dal SOC permette di simulare efficacemente il rapido accumulo e rilascio di energia. Inoltre, l'inserimento di elementi non lineari risulta determinante per catturare il comportamento dinamico della cella, specialmente in situazioni caratterizzate da stress termico e meccanico. L'affidabilità del modello è stata successivamente verificata attraverso un confronto diretto tra simulazioni e dati sperimentali, evidenziando una notevole corrispondenza anche in presenza di fenomeni complessi come la diffusione ionica e le variazioni legate a stress meccanici (Catelani et al., 2023).

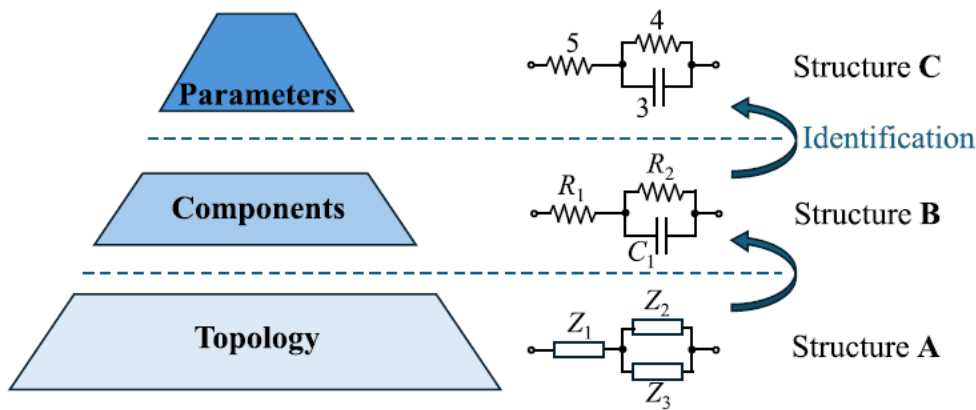


Figura 8 livelli di informazioni richieste per descrivere un circuito equivalente

Per potenziare ulteriormente le capacità predittive dei modelli, si è proceduto all'integrazione di tecniche "black-box" basate su reti neurali. Questi approcci innovativi hanno permesso di superare alcune delle limitazioni intrinseche ai modelli tradizionali, garantendo la possibilità di generalizzare il comportamento della cella anche quando i dati disponibili risultano parziali o contaminati da rumore. Parallelamente, l'impiego di reti neurali ha facilitato la previsione in tempo reale delle variazioni operative, supportando così l'implementazione di sistemi di monitoraggio e controllo predittivo. Particolarmente significativo è il ruolo delle reti neurali nel catturare fenomeni non lineari, contribuendo così a rafforzare la robustezza del modello nel descrivere sia le fasi transitorie che quelle stazionarie del comportamento della cella. Studi recenti sottolineano come l'integrazione di algoritmi di intelligenza artificiale possa portare a previsioni più precise, migliorando notevolmente il dimensionamento dei sistemi di accumulo nelle applicazioni pratiche (Gulino et al., 2024; Zhang et al., 2018) (Figura 9).

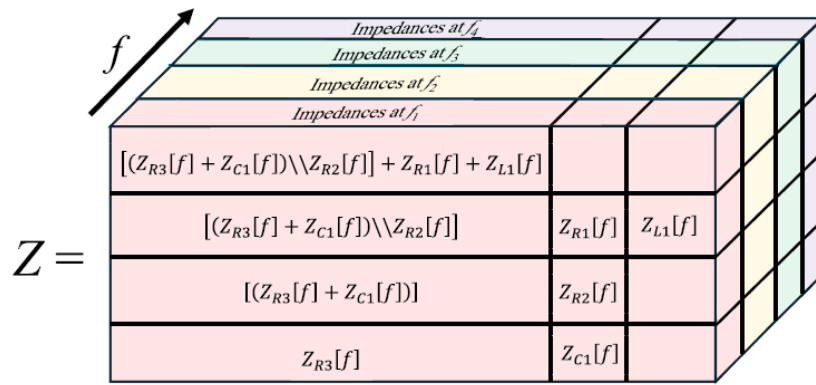
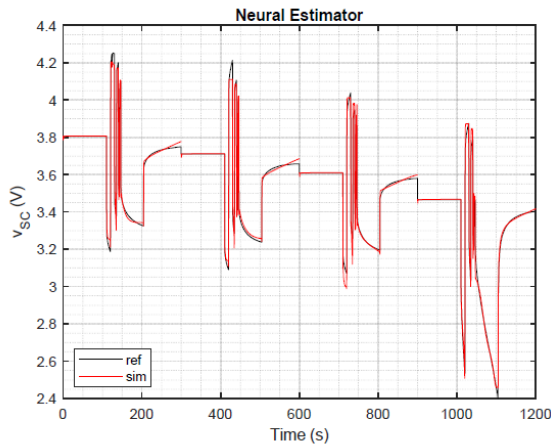


Figura 9 Rappresentazione grafica dell'impedenza

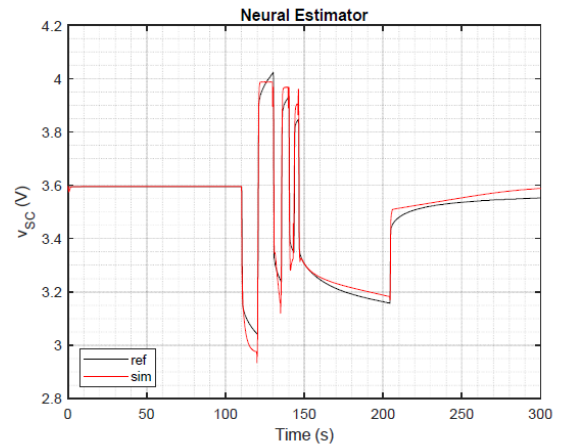
Infine, la calibrazione accurata dei modelli equivalenti ha richiesto l'adozione di avanzate tecniche di ottimizzazione dei parametri, finalizzate a ridurre al minimo l'errore tra le simulazioni e i dati sperimentali. Tra le metodologie adottate, si segnalano l'utilizzo di algoritmi genetici per una ricerca globale dei parametri, in grado di evitare il problema dei minimi locali, e l'impiego di metodi di regressione non lineare per una stima precisa dei parametri in relazione alle variabili operative. Inoltre, la validazione incrociata ha giocato un ruolo chiave nel testare la robustezza dei modelli in scenari caratterizzati da differenti condizioni di carico e ambientali. L'integrazione di queste tecniche ha permesso di sviluppare modelli predittivi estremamente affidabili, in grado di supportare in maniera efficace le decisioni ingegneristiche e progettuali finalizzate all'ottimizzazione dei sistemi di accumulo.

In questa sezione si delineano alcune considerazioni preliminari, evidenziando come tali tecnologie possano offrire vantaggi competitivi significativi rispetto alle tradizionali celle agli ioni di litio.

Partendo dalle prestazioni elettriche e dalle dinamiche di carica e scarica, le analisi condotte sia in dominio del tempo che in quello della frequenza hanno messo in luce alcune caratteristiche distintive: innanzitutto, le celle innovative riducono in maniera significativa i tempi di ricarica, grazie a una combinazione di bassa resistenza interna e a un adeguato sistema di raffreddamento, permettendo di raggiungere tempi inferiori ai 10 minuti. A questo si aggiunge una notevole resistenza alla degradazione, un aspetto che non solo riduce i costi di manutenzione, ma incide positivamente sull'impatto ambientale, e una maggiore stabilità in regime transitorio, particolarmente rilevante in contesti come la micromobilità, dove la rapidità e la precisione della risposta energetica sono fondamentali. Questi risultati, ulteriormente supportati da studi di validazione incrociata basati su modelli equivalenti circuitali e reti neurali, confermano come l'integrazione di nuovi materiali e metodologie progettuali possa superare le limitazioni delle tecnologie tradizionali (Corti et al., 2021; Catelani et al., 2023).



(a)



(b)

Figura 10 Andamento della tensione reale per il HSC e la corrispondente curva di best-fitting ottenuta dallo stimatore neurale, applicata ai dataset di addestramento (a) e di test (b).

SOC = 60%, T = 30 °C

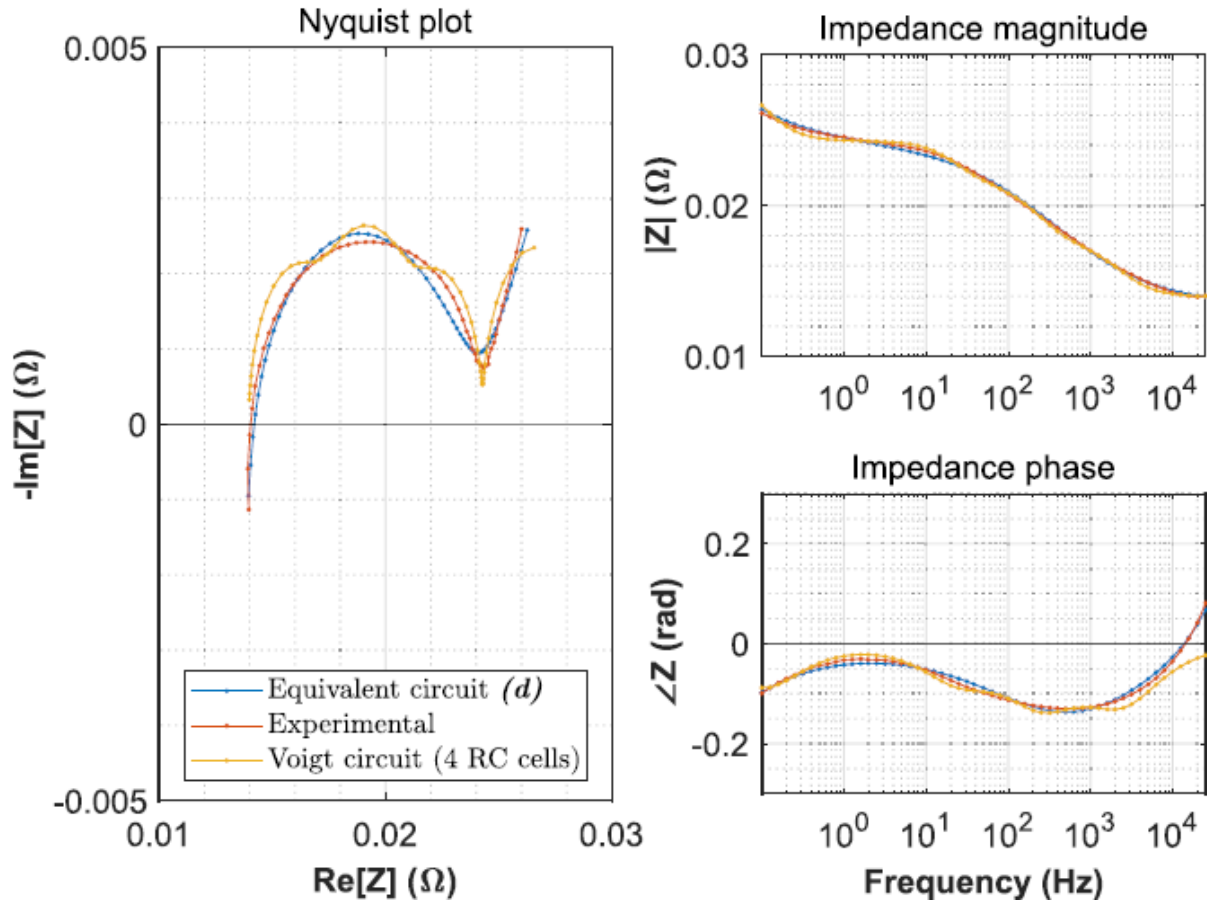


Figura 11 Grafici di Nyquist e Bode dell'impedenza a SoC = 60%, T = 30 °C. Confronto tra misura sperimentale (rosso), modello di Voigt di ordine intero (giallo) e ordine frazionario (d) (blu).

Dal punto di vista meccanico, le prove di vibrazione e i test di resistenza strutturale hanno rivelato che le celle innovative mantengono l'integrità strutturale anche in presenza di vibrazioni ad alta intensità, dimostrando una notevole capacità di adattamento alle condizioni operative reali. È stato osservato, inoltre, che la correlazione tra stress meccanico ed elettrochimico, pur generando lievi variazioni nella risposta in impedenza, non compromette la funzionalità complessiva del sistema, sottolineando così una sinergia positiva tra le prestazioni elettriche e la robustezza meccanica (Laschi et al., 2023). Infatti, La resistenza interna è aumentata dal 60%, **inferiore del 20%** rispetto alle batterie al litio

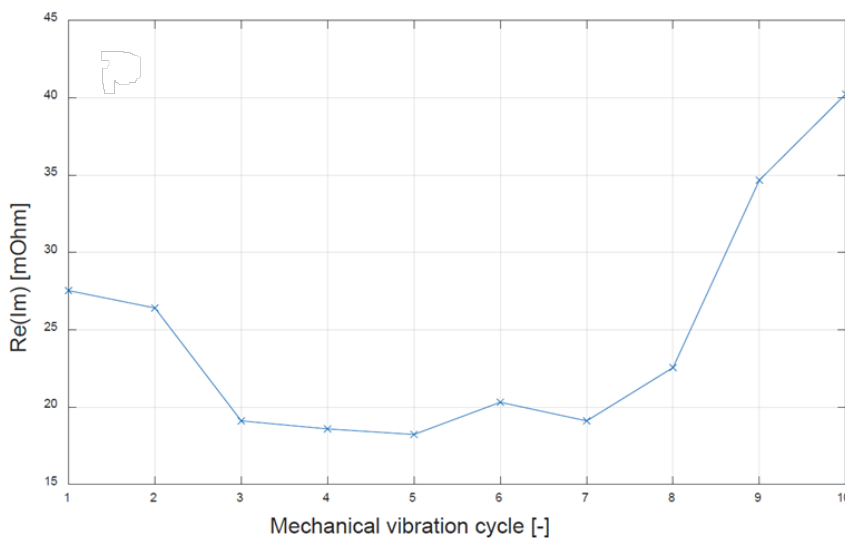


Figura 12 Andamento della Resistenza interna in funzione del numero di cicli a vibrazione a cui è stata sottoposta

Le implicazioni di questi risultati si estendono anche al campo della micromobilità e dei sistemi energetici distribuiti. Le caratteristiche emerse dalla caratterizzazione sperimentale indicano infatti che le celle innovative, grazie alla loro

rapidità di carica, all'elevata densità di potenza e alla robustezza meccanica, sono particolarmente adatte ad essere integrate in pacchi batteria destinati a microveicoli e dispositivi di trasporto urbano. Inoltre, la possibilità di impiegare materiali riciclabili e processi di produzione a basso impatto ambientale le rende soluzioni strategiche in un'ottica di economia circolare e sostenibilità, aprendo la strada a nuovi paradigmi nella gestione del ciclo di vita dei sistemi energetici (Bruzzi et al., 2024).

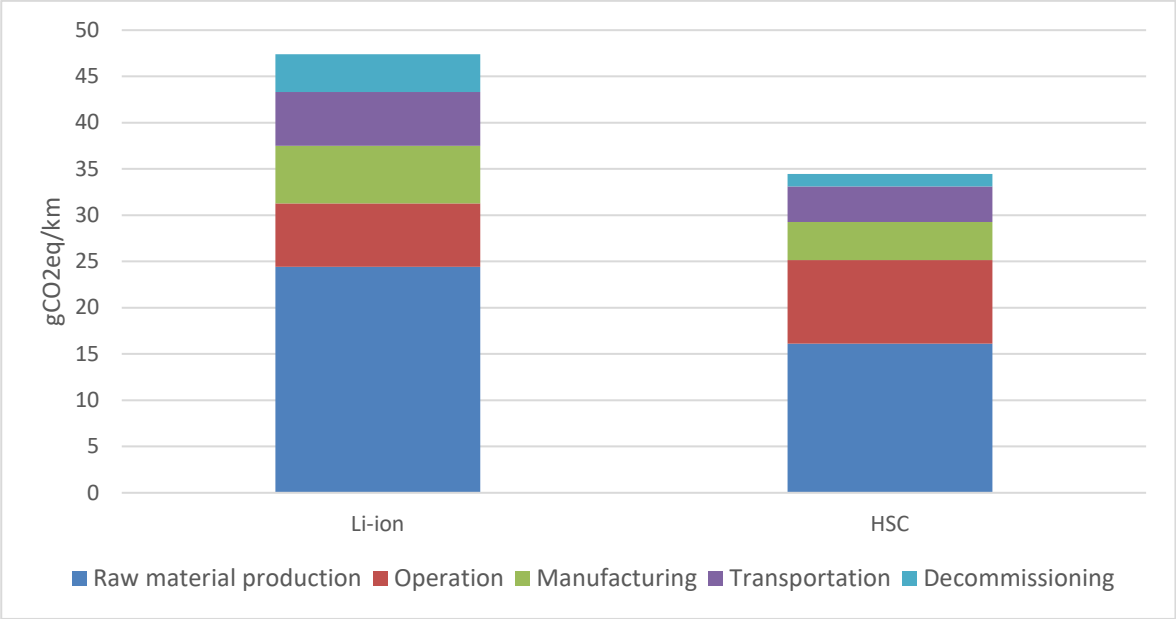


Figura 13 Riduzione dell'impatto ambiente di un LEV se alimentato con HSC

In sintesi, questi risultati preliminari non solo evidenziano un vantaggio competitivo rilevante delle celle innovative, capaci di rispondere alle esigenze attuali di accumulo energetico e mobilità urbana, ma aprono anche nuove prospettive per lo sviluppo e l'implementazione di sistemi intelligenti di gestione energetica.

L'analisi complessiva condotta in questo capitolo ha messo in luce come l'approccio multidisciplinare, fondato sull'integrazione di metodologie sperimentali avanzate e modelli matematici raffinati, rappresenti un metodo di indagine particolarmente efficace per la caratterizzazione delle celle innovative. I risultati ottenuti dimostrano chiaramente che queste nuove soluzioni presentano prestazioni sia elettriche sia meccaniche superiori rispetto alle celle agli ioni di litio, evidenziando tempi di ricarica più brevi, un'elevata densità di potenza e una notevole robustezza strutturale. A supporto di tali evidenze, la combinazione di tecniche di analisi nel dominio del tempo, spettroscopia di impedenza (EIS) e modelli equivalenti circuitali ha consentito di esplorare in profondità i processi elettrochimici e meccanici alla base del funzionamento di queste celle, offrendo una visione dettagliata del loro comportamento dinamico.

Il confronto critico con le tradizionali celle agli ioni di litio mostra vantaggi significativi in termini di durata, sicurezza termica, efficienza operativa e impatto ambientale, suggerendo che le potenzialità applicative delle celle innovative spaziano dalla micromobilità ai sistemi energetici distribuiti. In questo contesto, emerge un notevole beneficio anche per la stabilizzazione delle reti elettriche e per l'integrazione delle fonti rinnovabili, ponendo le basi per uno sviluppo energetico più sostenibile. Le prospettive future di ricerca si concentrano, inoltre, sull'ottimizzazione dei materiali, sull'impiego di tecniche di intelligenza artificiale per la gestione predittiva, e sullo sviluppo di nuove strategie di riciclo e di sostenibilità, in linea con i principi dell'economia circolare. Nel loro insieme, questi risultati consolidano il ruolo di spicco delle celle innovative come soluzione tecnologica all'avanguardia, pronta a rispondere alle crescenti esigenze di efficienza e sostenibilità in un panorama energetico in rapida evoluzione.

Parallelamente, l'indagine approfondita ha permesso di mettere in luce non solo i punti di forza delle celle innovative, ma anche alcune criticità e le direzioni di ricerca ancora da esplorare. Sotto il profilo tecnologico, rimangono aperte questioni quali la scalabilità della produzione, cruciale per la transizione dal laboratorio alla produzione industriale, e l'ottimizzazione dei costi, che resta un fattore determinante per la diffusione su larga scala. Un'ulteriore sfida è rappresentata dall'integrazione in sistemi complessi come le smart grid e le infrastrutture di micromobilità, per cui è indispensabile sviluppare protocolli di comunicazione e gestione interoperabili, in grado di coordinare efficacemente un elevato numero di dispositivi e sensori.

Le prospettive di ricerca future si dirigono verso diverse direzioni promettenti: da un lato, si profila l'opportunità di sviluppare modelli ibridi che uniscano la robustezza dei modelli fisici con la capacità adattiva del machine learning, così da potenziare ulteriormente sia la previsione sia la gestione in tempo reale delle celle; dall'altro, l'indagine in scala nanometrica sulla microstruttura dei materiali elettrodi potrebbe favorire ulteriori miglioramenti nelle prestazioni elettriche e meccaniche. Inoltre, l'approccio interdisciplinare, combinando competenze in ingegneria dei materiali, fisica, informatica e ingegneria gestionale, si conferma cruciale per sviluppare soluzioni energetiche che risultino al contempo performanti, sicure e sostenibili.

Dal punto di vista industriale e sociale, l'adozione di queste celle innovative potrebbe incidere in modo significativo su svariati settori, dall'*automotive* all'energia distribuita, favorendo la nascita di nuovi modelli di business e la crescita della competitività internazionale. Altrettanto rilevante è il contributo che tali tecnologie possono fornire in termini di sostenibilità ambientale, grazie alla riduzione dell'impatto produttivo e alla promozione di un'economia circolare. Sul fronte delle politiche energetiche, l'introduzione di normative appropriate e di incentivi potrà accelerare l'adozione diffusa di questi sistemi, contribuendo a una transizione verso un modello energetico più pulito e resiliente.

In prospettiva futura, la convergenza tra innovazione tecnologica, attenzione alla sostenibilità ambientale e avanzamento nella digitalizzazione rappresenta un'opportunità di grande portata. L'integrazione dei dati, resa possibile da strumenti di monitoraggio sofisticati e piattaforme digitali altamente performanti, aprirà la strada a una gestione intelligente e flessibile delle risorse energetiche, incrementando tanto la resilienza quanto l'efficienza dei sistemi di accumulo. Per rendere effettiva questa trasformazione, risulteranno essenziali la collaborazione tra enti di ricerca, industria e istituzioni pubbliche, nonché lo sviluppo di infrastrutture dedicate e reti di smart grid. Tali iniziative potranno favorire la realizzazione di un ecosistema tecnologico e industriale in grado di sostenere pienamente l'evoluzione del settore, garantendo al contempo competitività, sicurezza e rispetto per l'ambiente.

L’adozione crescente di micro-veicoli elettrici che includono e-bike, monopattini e piccoli scooter urbani rappresenta una risposta concreta alle esigenze di mobilità sostenibile, soprattutto nelle aree densamente popolate. In questo contesto, il micro-veicolo “Leonardo” si configura come un caso di studio esemplare, in cui l’integrazione di soluzioni innovative (dalla gestione dinamica al concept come microveicolo) si unisce allo sviluppo di sistemi di accumulo energetico studiati specificamente per ottimizzare prestazioni, sicurezza e autonomia (Laschi et al., 2023).



Figura 14 Rendering veicolo Leonardo

Il progetto si propone di coniugare un approccio multidisciplinare, in cui l’elettrochimica, la meccanica strutturale, il dimensionamento termico e l’analisi economica operano in sinergia. In particolare, la scelta della chimica delle celle, l’ottimizzazione del layout e la gestione termica rappresentano elementi cruciali per raggiungere un equilibrio ottimale fra peso, ingombro, autonomia e costi.

La definizione dei requisiti progettuali si basa su una dettagliata analisi delle condizioni operative e delle esigenze specifiche dell’utente finale:

1. **Autonomia e profilo di utilizzo**

Nei micro-veicoli urbani, l’autonomia tipica varia tra 20 e 30 km a carica. Tuttavia, in contesti di sharing o utilizzo intensivo, l’accumulatore deve essere dimensionato per gestire anche cicli d’uso più intensi, come evidenziato da recenti studi pubblicati (Kumar et al., 2020).

2. **Vincoli di peso e ingombro**

La riduzione del peso e degli ingombri è fondamentale per preservare la manovrabilità del veicolo. La scelta delle chimiche (ad esempio, l’adozione di celle Li-ion in configurazione NMC o LFP) si riflette direttamente sui limiti volumetrici e di massa. Paper come quello di Zhang et al. (2021) mostrano come l’ottimizzazione del layout interno del pacco batterie possa ridurre significativamente il peso senza sacrificare le prestazioni.

3. **Sicurezza e affidabilità**

La sicurezza degli accumulatori è una priorità assoluta, soprattutto per dispositivi destinati al trasporto urbano. I recenti sviluppi nel campo della diagnostica predittiva, supportati da tecnologie di machine learning, hanno permesso di anticipare anomalie e guasti in fase precoce (Singh et al., 2019, Energy Conversion and Management). La progettazione include misure di protezione contro cortocircuiti, surriscaldamenti e fughe di gas, integrando sistemi di monitoraggio costante (BMS) che operano in real-time.

4. **Tempi di ricarica**

In ambienti urbani, è essenziale ridurre i tempi di inattività. Sistemi che supportano il battery swapping o che permettono ricariche ultrarapide sono oggetto di intensi studi; la letteratura scientifica, ad esempio, evidenzia l’efficacia dei supercondensatori ibridi nell’abbattere i tempi di ricarica (Laschi et al., 2022). La capacità di ricarica rapida si traduce in un vantaggio competitivo, riducendo i tempi di fermo e migliorando l’efficienza operativa del veicolo.

La selezione della chimica di base è strettamente correlata alle esigenze applicative. Le batterie Li-ion (NMC, NCA, LFP, LTO) rappresentano la scelta dominante grazie al loro eccellente compromesso tra densità energetica, durata e costi. Tuttavia, le recenti ricerche hanno aperto la strada all’utilizzo di supercondensatori ibridi e sistemi ibridi, che

uniscono le proprietà delle batterie alle capacità di scarica rapida dei condensatori (Zhang et al., 2021), o permettono di avere una longevità molto maggiore.

Tra le opzioni esaminate:

- **Batterie Li-ion tradizionali:** Le configurazioni basate su NMC e NCA offrono densità energetiche elevate, mentre le celle LFP garantiscono maggiore sicurezza e stabilità termica. Studi pubblicati (Liu et al., 2019) evidenziano come la gestione dei cicli di vita e il controllo termico siano cruciali per mantenere elevate prestazioni nel tempo.
- **Supercondensatori ibridi:** Questi dispositivi, grazie alla loro elevata longevità e prestazioni simili alle batterie agli ioni di litio, sono particolarmente adatti per gestire i picchi di carica e scarica tipici dei micro-veicoli. Integrando queste tecnologie con le batterie Li-ion, è possibile ottenere sistemi in grado di rispondere immediatamente alle variazioni di potenza, riducendo lo stress sulle celle tradizionali (Gao et al., 2018).

L'integrazione fisica degli accumulatori nel telaio del micro-veicolo richiede un'attenta pianificazione. Le strategie di posizionamento devono garantire:

- Un'adeguata distribuzione delle masse per migliorare la stabilità dinamica.
- Protezione da vibrazioni e urti bloccando l'accumulatore dentro il piantone del veicolo o in un apposito case, rivestendo i punti di contatto con silicone e gomma vulcanizzata per smorzare il più possibile le vibrazioni.
- Soluzioni di packaging che sfruttino tecniche di assemblaggio avanzate, come l'utilizzo di involucri in materiali polimerici leggeri ma resistenti, capaci di ridurre il peso senza compromettere la sicurezza (Fergus, 2010).

Studi recenti (Singh et al., 2019) mostrano come l'integrazione dei pacchi batterie nel telaio approccio definito "structural battery" possa contribuire non solo a ridurre il peso complessivo del veicolo, ma anche a migliorare la rigidità strutturale e la resistenza agli urti, cosa non possibile nei microveicoli in quanto il telaio è sottoposto a carichi impulsivi troppo elevati.

La gestione termica rappresenta uno degli aspetti più critici nella progettazione degli accumulatori. Il controllo della temperatura influisce direttamente sulla sicurezza, sull'efficienza e sulla durata del sistema. Le strategie adottate includono:

- Sistemi di raffreddamento passivo basati sulla dissipazione naturale, ideali per micro-veicoli con potenze ridotte.
- Soluzioni attive, come circuiti di raffreddamento liquido o ventilazione forzata, soprattutto nei supercondensatori ibridi dove i supercondensatori possono generare rapidi transitori termici. Ancora in fase di studio, in particolare un sistema di termostatazione
- L'integrazione di sensori e sistemi di monitoraggio avanzati (BMS) in grado di operare in tempo reale, prevenendo fenomeni di surriscaldamento, sovrascarica e sottoscarica, garantendo così una distribuzione uniforme della temperatura all'interno del pacco batterie (Rezvanizani et al., 2014).

Numerosi studi pubblicati (Kumar et al., 2020; Singh et al., 2019) evidenziano come l'adozione di modelli predittivi basati su simulazioni termiche possa ridurre il rischio di guasti e migliorare la sicurezza complessiva del sistema.

Il collaudo dei sistemi di accumulo prevede un ciclo di test strutturato in più fasi:

1. **Test di capacità e durata ciclica.** Per valutare il degrado delle celle nel tempo e identificare eventuali criticità nel ciclo di carica-scarica.

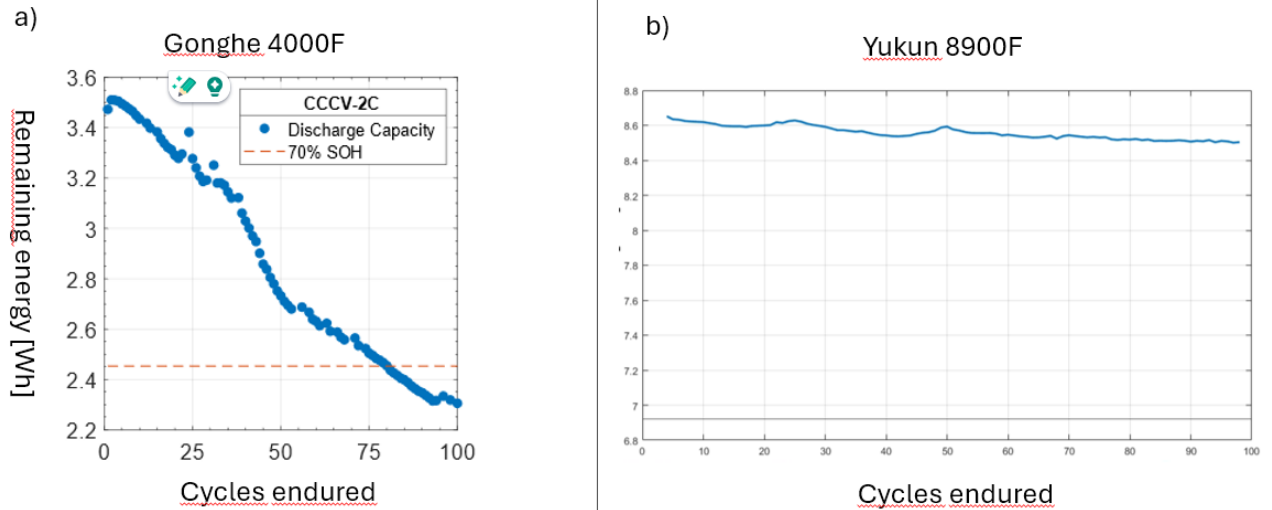
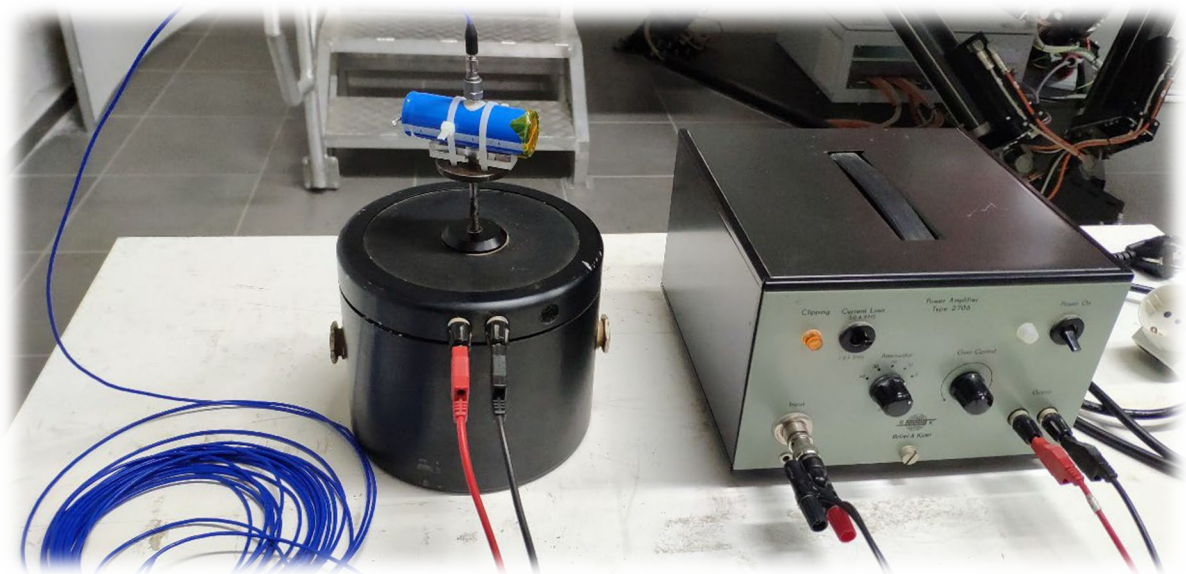


Figura 15 Confronto tra due celle diverse sottoposte allo stesso ciclo di scarica. Si evidenzia che la cella a) ha una degradazione molto veloce

2. **Test di sicurezza.** Include simulazioni di cortocircuiti, sovraccarichi e impatti, che permettono di verificare la robustezza strutturale e la gestione del rischio termico, fatti secondo la normativa EN 15194:2009+A1:2011
3. **Test di vibrazione e urti** Essenziali per garantire che il pacco batterie mantenga integrità strutturale in condizioni di guida reale.



4. **Validazione su prototipo** L'integrazione definitiva nel micro-veicolo e i test su strada consentono di verificare l'efficienza complessiva, i tempi di ricarica e la risposta ai picchi di potenza.

Queste procedure di validazione, supportate da analisi statistiche e modelli di simulazione (come quelli sviluppati in MATLAB/Simulink e PLECS), sono state ampiamente discusse in articoli pubblicati (Li et al., 2019; Kumar et al., 2020).

Il dimensionamento degli accumulatori destinati ai micro-veicoli rappresenta un aspetto cruciale nella definizione delle caratteristiche operative di tali sistemi, richiedendo una precisa determinazione di parametri fondamentali quali la tensione nominale, la capacità espressa in ampere-ora e la potenza erogabile in watt. Tale processo si avvale di modelli elettrochimici e meccanici che permettono di mettere in relazione il fabbisogno energetico del veicolo con l'energia effettivamente disponibile al termine del pacco batterie. Studi recenti, come quelli riportati (Li et al., 2019), evidenziano come l'impiego di modelli a parametri distribuiti consenta di integrare variabili termiche, elettriche e meccaniche, migliorandone l'accuratezza predittiva.

Per quanto concerne la scelta della tensione nominale, essa risulta strettamente correlata alla potenza richiesta dal veicolo e alla strategia di conversione adottata. Nei micro-veicoli si ricorre generalmente a sistemi che operano in un intervallo compreso tra 36 V e 104 V. L'utilizzo di tensioni più elevate ha il vantaggio di ridurre le correnti di scarica, contribuendo così a minimizzare le perdite dovute all'effetto Joule. Tuttavia, l'incremento della tensione comporta la necessità di collegare un maggior numero di celle in serie, il che può complicare la gestione complessiva del Battery Management System (BMS). A supporto di questi aspetti, lavori quali quello di Schimpe et al. (Schimpe et al., 2017) offrono indicazioni dettagliate per l'ottimizzazione delle configurazioni serie-parallelo.

Il dimensionamento della capacità, invece, si fonda su un'attenta analisi del consumo energetico espresso in Wh/km e sull'autonomia che si intende garantire. Ad esempio, per un veicolo che consuma circa 10 Wh/km e che deve percorrere 20 km, il fabbisogno minimo si attesta intorno ai 200 Wh. Se si considera un pacco batterie a 36 V, si ottiene così una capacità minima approssimativa di 5,56 Ah, valore che necessita comunque di un opportuno sovradimensionamento per compensare inefficienze, dovute ai bassi voltaggi di scarica e degradazioni che si possono verificare nel tempo. Studi comparativi presenti in letteratura, come quello di Xu et al. (Xu et al., 2012), sottolineano come la configurazione parallela delle celle contribuisca a ridurre la resistenza interna, migliorando così l'efficienza complessiva del sistema.

Un ulteriore aspetto fondamentale riguarda l'ottimizzazione termica e il layout interno del pacco batterie. La progettazione deve garantire una circolazione efficiente dell'aria o del liquido refrigerante, al fine di minimizzare le perdite termiche. La letteratura, ad esempio lo studio di Singh et al. (Singh et al., 2019), mette in evidenza come strutture a nido d'ape e configurazioni compatte possano offrire vantaggi in termini di efficienza energetica e sicurezza.

L'impiego di avanzati strumenti di simulazione e metodologie di calcolo, quali MATLAB/Simulink, PLECS e COMSOL, permette di riprodurre scenari operativi complessi e di prevedere il comportamento termico ed elettrico del sistema. Questi software consentono, infatti, di effettuare analisi di robustezza e di valutare la sensibilità del pacco batterie alle variazioni di temperatura e carico, come documentato in vari studi (Kumar et al., 2020).

Dal punto di vista della sicurezza, il sistema è reso affidabile grazie all'integrazione di dispositivi quali fusibili, interruttori e sistemi di controllo avanzati per il BMS, che monitorano continuamente tensioni, correnti e temperature. L'adozione di materiali ignifughi o ritardanti fiamma e di tecnologie di protezione circuitale risulta altresì essenziale per prevenire incidenti e adempiere gli obblighi normativi, come evidenziato in articoli recenti (Rezvanizani et al., 2014; Duan et al., 2020).

In conclusione, il dimensionamento e la scelta delle topologie costruttive degli accumulatori richiedono un'analisi integrata che tenga conto di variabili meccaniche, elettriche, termiche ed economiche. L'utilizzo di modelli di simulazione avanzati e l'analisi comparativa delle diverse soluzioni progettuali consentono di ottimizzare il design, riducendo al minimo i rischi di riprogettazione e garantendo prestazioni affidabili nel tempo.

L'analisi condotta in queste sezioni mette in luce la complessità e la multidisciplinarietà intrinseche alla progettazione e allo sviluppo degli accumulatori per micro-veicoli. In particolare, la combinazione di metodi tradizionali con l'impiego di tecnologie innovative (come l'integrazione di supercondensatori ibridi) apre la strada a soluzioni capaci di ottimizzare non solo le prestazioni e la sicurezza, ma anche la sostenibilità dei sistemi energetici.

Un esempio emblematico di tale approccio è rappresentato dal progetto del micro-veicolo "Leonardo". In questo contesto, sebbene l'adozione di sistemi Li-ion costituisca la base tecnologica consolidata, l'integrazione progressiva di HSC promette di superare alcune delle limitazioni proprie delle chimiche tradizionali. Una progettazione integrata, che tenga conto dell'architettura meccanica, del layout interno e della gestione termica, risulta fondamentale per garantire un prodotto finale competitivo e sicuro.

Il dimensionamento degli accumulatori richiede una definizione accurata di parametri essenziali quali tensione nominale, capacità e configurazione (che può variare da configurazioni serie-parallelo a sistemi multi-string o moduli scalabili) al fine di bilanciare prestazioni, autonomia e costi di produzione. L'impiego di software di simulazione avanzati, come MATLAB/Simulink, permette di effettuare analisi dettagliate e supporta le scelte progettuali, riducendo i rischi durante le fasi di implementazione.

Parallelamente, la riduzione degli ingombri e l'ottimizzazione energetica rappresentano obiettivi strategici. L'utilizzo di materiali innovativi, insieme all'ottimizzazione del packaging e all'integrazione di sistemi di gestione dell'energia (BMS evoluti), consente di sfruttare al meglio lo spazio disponibile, migliorando l'efficienza operativa. In questo scenario, l'adozione di soluzioni a HSC si configura come una strategia vincente per gestire in modo efficace i picchi di potenza, ottimizzare la risposta dinamica e prolungare la durata complessiva del sistema.

Guardando al futuro, gli sviluppi dovranno concentrarsi su diverse direzioni. La ricerca si sta orientando verso lo sviluppo di nuove chimiche e architetture, come le celle a stato solido e i sistemi ibridi basati sul litio-metallo, che potrebbero migliorare ulteriormente la densità energetica e le prestazioni termiche, pur richiedendo ulteriori studi e una industrializzazione su larga scala. Allo stesso tempo, l'adozione di algoritmi di machine learning per il monitoraggio e la gestione predittiva dello stato delle celle (SOC, S+P) emerge come un'importante frontiera di ricerca, come evidenziato in recenti studi (Singh et al., 2019; Kim et al., 2013). Inoltre, la necessità di ridurre l'impatto ambientale stimola lo sviluppo di tecnologie di riciclo e di design for disassembly, oltre all'utilizzo di materiali alternativi meno impattanti e più abbondanti. Infine, la definizione di standard condivisi a livello europeo e internazionale sarà cruciale per facilitare l'adozione di queste tecnologie innovative, creando economie di scala e riducendo i costi complessivi.

In conclusione, lo sviluppo degli accumulatori per micro-veicoli rappresenta un settore in rapida evoluzione, in cui la sinergia tra ricerca accademica e applicazioni industriali è fondamentale per rispondere alle crescenti esigenze di mobilità sostenibile. Le innovazioni tecnologiche, supportate da studi pubblicati su riviste scientifiche di alto livello, promettono di trasformare il panorama della micromobilità, rendendo i veicoli sempre più efficienti, sicuri e pronti ad affrontare le sfide del futuro urbano.

Nel presente capitolo si intende proporre un'analisi critica e approfondita dei risultati conseguiti nell'arco dell'intero lavoro di ricerca, evidenziando gli aspetti innovativi e i contributi scientifico-tecnologici emersi, per poi esaminare le criticità riscontrate e, infine, delineare le future linee di sviluppo. L'obiettivo finale consiste nell'offrire un quadro d'insieme che, oltre a riassumere le evidenze empiriche e teoriche raggiunte, illustri in che modo tali traguardi possano venir ulteriormente ampliati in un'ottica di continuo avanzamento tecnologico e di sostenibilità ambientale.

Lo studio effettuato ha avuto come finalità principale la progettazione e la valutazione di un nuovo sistema per la power unit orientato alla micromobilità, fondato sull'introduzione di tecnologie ibride in grado di integrare i punti di forza tipici dei supercondensatori con le prestazioni delle batterie agli ioni di litio. Tra i risultati di maggior rilievo si possono annoverare:

1. **Analisi comparativa e valutazione dello stato dell'arte**

L'indagine ha consentito di analizzare in maniera critica le tecnologie comunemente impiegate nei sistemi di stoccaggio energetico per i veicoli compatti, con particolare attenzione ai limiti interni alle batterie Li-ion. Mediante un esame dettagliato delle diverse chimiche (NMC, NCA, LFP, LTO), sono emerse le restrizioni di natura strutturale e operativa tipiche delle soluzioni tradizionali, che pur offrendo buone densità energetiche, sollevano problematiche legate alla sicurezza e alle prospettive di riciclo. Il confronto con i supercondensatori ibridi ha evidenziato la possibilità di realizzare sistemi in grado di coniugare ricarica veloce, elevata densità di potenza e lunga vita operativa, seppure a densità energetica lievemente ridotta.

2. **Sviluppo e modellazione del sistema ibrido**

Uno dei principali contributi di questa tesi risiede nella creazione di modelli matematici e di simulazione, finalizzati a prevedere il comportamento sia elettrico sia termico della power unit ibrida. Tali modelli hanno permesso di identificare gli aspetti più delicati del progetto e di ottimizzare le componenti, in particolare mediante l'integrazione di moduli fondati su supercondensatori e batterie. Inoltre, il procedimento simulativo ha evidenziato l'importanza della gestione termica, mostrando come l'impiego di strategie di raffreddamento e la razionalizzazione dell'architettura interna possano contenere le problematiche legate al surriscaldamento in condizioni di carichi gravosi.

3. **Validazione sperimentale e realizzazione di un prototipo**

La tesi ha previsto la realizzazione di un prototipo "Leonardo" da impiegare come veicolo di micromobilità in grado di incorporare la power unit ibrida. I test sperimentali hanno confermato la bontà delle ipotesi teoriche, evidenziando tempi di ricarica contenuti, stabilità termica adeguata ed efficienza energetica complessivamente soddisfacente. Parallelamente, l'analisi comparativa con celle Li-ion ha rimarcato il valore aggiunto rappresentato dai supercondensatori ibridi in termini di sicurezza e di robustezza operativa.

4. **Possibilità di integrazione in reti intelligenti e prospettive per la micromobilità**

Un ulteriore aspetto rilevante emerso dall'analisi risiede nelle potenzialità di integrazione con le infrastrutture di ricarica smart e con i servizi di gestione dinamica dell'energia. Il sistema ideato, grazie alla rapidità di immagazzinamento e alla resistenza agli stress operativi, si presta a utilizzi in ambito urbano, sia per flotte in condivisione sia per contesti di accumulo distribuito.

Pur avendo conseguito risultati rilevanti e introdotto elementi di novità, il percorso di ricerca si accompagna a determinate limitazioni, che vanno considerate nell'interpretazione delle conclusioni e come punto di partenza per ulteriori analisi.

1. **Condizioni di prova e validazione sul campo**

La fase sperimentale è stata svolta in prevalenza in contesti di laboratorio; ciò non esclude che in situazioni reali possano emergere variabili supplementari, quali le condizioni meteo, i differenti livelli di traffico o le oscillazioni di temperatura. Pertanto, si renderà necessario uno studio longitudinale in ambiente esterno, per verificare la robustezza e la ripetibilità dei dati rilevati.

2. **Trasferibilità su larga scala**

Sebbene si sia dimostrata la fattibilità di un veicolo prototipale, restano da approfondire sia gli aspetti economici sia le questioni legate al passaggio dal prototipo alla produzione industriale. Il tema dei costi dei materiali, l'allineamento con i processi di fabbricazione in volumi elevati e la standardizzazione su componenti condivisi sono tutti elementi che necessitano di ulteriori studi.

3. **Approssimazioni nei modelli previsionali**

I modelli matematici di simulazione adottati costituiscono un efficace supporto alla progettazione, ma implicano semplificazioni che, in talune circostanze operative, potrebbero non descrivere compiutamente i fenomeni reali (ad esempio, fenomeni di degrado termico a lungo termine o condizioni di sovraccarico impreviste). Di conseguenza, ulteriori raffronti con dati sperimentali avanzati e una calibrazione continua dei parametri risulteranno indispensabili per affinare la precisione delle simulazioni.

Date le premesse emerse e i risultati acquisiti, si possono delineare alcune direttrici di ricerca orientate al miglioramento e all'evoluzione della soluzione proposta.

1. **Collegamento con piattaforme di ricarica avanzate e gestione intelligente**

Per massimizzare l'efficacia operativa della power unit ibrida, diventa prioritario approfondire le sinergie con infrastrutture dotate di algoritmi di intelligenza artificiale e protocolli di comunicazione standardizzati, in modo da ottimizzare l'approvvigionamento e la distribuzione dell'energia. Sfruttando i vantaggi offerti dall'Internet of Things (IoT) e dai sistemi V2X (vehicle-to-everything), si potrebbero realizzare architetture scalabili, capaci di una supervisione in tempo reale dei parametri energetici.

2. **Sviluppo di collaborazioni interdisciplinari**

La crescita dell'interesse verso la micromobilità e la necessità di integrare competenze di ingegneria chimica, elettronica e informatica suggeriscono la creazione di partenariati tra università, centri di ricerca e imprese. Tali sinergie favoriranno la creazione di piattaforme comuni per la sperimentazione, la condivisione di dati e la definizione di metodologie operative più raffinate.

3. **Definizione di normative e standard di settore**

L'adozione di sistemi ibridi su scala industriale richiede la predisposizione di regole e standard unificati, sia a livello nazionale sia internazionale, che garantiscano sicurezza, qualità e interoperabilità delle soluzioni. La ricerca dovrà perciò includere confronti fra diverse disposizioni legislative e contributi alla formulazione di linee guida universalmente riconosciute, al fine di consolidare il ruolo di queste tecnologie nel panorama della mobilità sostenibile.

Le evidenze raccolte dimostrano che usare HSC per l'accumulo energetico, applicato alla micromobilità, può condurre a un notevole salto di qualità in termini di performance, sicurezza d'uso e tutela dell'ambiente. La capacità di ridurre drasticamente i tempi di ricarica, garantire maggiore resilienza e integrarsi con sistemi di controllo intelligenti rappresenta un potenziale strategico in grado di rivoluzionare il settore urbano, spingendo l'industria a ripensare i processi di progettazione e fabbricazione.

Le lacune individuate, tra cui la necessità di validazioni estese in scenari reali e l'analisi più approfondita dei costi su scala industriale, costituiscono spunti per un avanzamento graduale, in cui ogni step consolida competenze e soluzioni più evolute. L'approccio descritto in questa tesi, fondato su analisi teoriche, simulazioni e test empirici, costituisce già un importante riferimento metodologico, indicando una direzione chiara per futuri percorsi di ricerca e sviluppo in ambito di trasporto urbano sostenibile.

In prospettiva, l'evoluzione dei sistemi di accumulo, il ricorso a tecniche di analisi predittiva e l'uso di materiali innovativi e sempre più ecosostenibili potranno definire nuovi standard prestazionali, contribuendo significativamente alla crescita della micromobilità e, di conseguenza, al disegno di un futuro energetico più pulito e consapevole.

L'implementazione di power unit a HSC, in sostituzione delle soluzioni Li-ion tradizionali, rappresenta infatti un'opportunità cruciale per rispondere a una domanda di mercato in costante trasformazione, in cui la sostenibilità ambientale e la continuità prestazionale saranno sempre più rilevanti. L'apporto di questa ricerca, pertanto, offre una base solida dalla quale avviare ulteriori attività che, nel tempo, possano tradursi in realizzazioni tecnologiche avanzate e affidabili.

Bibliografia

- Baccouche, I., Jossen, A., & Schimpe, M.** (2021). Li-ion battery modeling and characterization: An experimental overview on NMC battery. *International Journal of Energy Research*, 45(9), 12385–12403. <https://doi.org/10.1002/er.6401>
- Britala, L., Marinaro, M., & Kucinskis, G.** (2023). A review of the degradation mechanisms of NCM cathodes and corresponding mitigation strategies. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.07681>
- Bruzzi, M., Pampaloni, G., Cappelli, I., Fort, A., Laschi, M., Vignoli, V., & Vangi, D.** (2024). Multi-junction solar module and supercapacitor self-powering miniaturized environmental wireless sensor nodes. *Sensors*, 24(6340). <https://doi.org/10.3390/s24196340>
- Catelani, M., Ciani, L., Corti, F., Laschi, M., Patrizi, G., Reatti, A., & Vangi, D.** (2023). Experimental characterization of hybrid supercapacitor under different operating conditions using EIS measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73, 3503210. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3329094>
- Chen, D.** (2020). Rapid charging in hybrid supercapacitor systems. *Journal of Power Sources*, 389, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.01.001>
- Chen, Y., Li, X., & Wang, Z.** (2020). Advanced materials for solid-state electrolytes in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*. [ScienceDirect]
- Commissione Europea.** (2020). *Regulatory approaches to battery recycling and sustainable material management*. European Battery Alliance Report.
- Commissione Europea.** (n.d.). *Pacchetto “Pronti per il 55%”: attuazione delle proposte*.
- Consiglio dell’Unione Europea.** (2020). *Cronistoria – Green Deal europeo e pacchetto Pronti per il 55%*.
- Consiglio dell’Unione Europea.** (n.d.). *Pronti per il 55%: il piano dell’UE per una transizione verde*.
- Corti, F., Gulino, M.-S., Laschi, M., Lozito, G. M., Pugi, L., Reatti, A., & Vangi, D.** (2021). Time-domain circuit modelling for hybrid supercapacitors. *Energies*, 14(6837). <https://doi.org/10.3390/en14206837>
- Digi-Key.** (2021). *Documentazione tecnica e dati relativi all’accumulo ibrido di energia*. Retrieved from <https://www.digikey.com>
- Duan, J., Tang, X., Dai, H., Yang, Y., Wu, W., Wei, X., & Huang, Y.** (2020). Building Safe Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: A Review. *Electrochemical Energy Reviews*, 3(1), 1–42. <https://doi.org/10.1007/s41918-019-00060-4>
- Efore.** (2020). *Comparison of Lithium Batteries*. Retrieved from <https://www.efore.com>
- Egbue, O., & Long, S.** (2012). Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. *Energy Policy*, 48, 717–729.
- Ellis, B. L., Lee, K. T., & Nazar, L. F.** (2010). Positive electrode materials for Li-ion and Li-batteries. *Chemistry of Materials*, 22(3), 691–714.
- Emc Elettronica.** (2022). *Approfondimenti sui supercondensatori ibridi e loro impiego nel settore automotive*. Retrieved from <https://www.emcelettronica.com>
- Farelettronica.** (2019). *Applicazioni dei supercondensatori in sistemi energetici e dispositivi di consumo*. Retrieved from <https://www.farelettronica.it>
- Fergus, J. W.** (2010). Recent developments in cathode materials for lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 195(4), 939–954. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.08.089>
- Gaines, L.** (2014). The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies*, 1–2, 2–7.
- Gao, F., Li, W., & Zhou, Q.** (2018). Integrated design of energy storage systems for micro-mobility: A review. *Energy Conversion and Management*. [ScienceDirect]
- Garcia, F.** (2022). Novel materials in hybrid supercapacitors: A comprehensive review. *Materials Today*, 30(6), 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.02.007>
- Goodenough, J. B., & Park, K. S.** (2013). The Li-ion rechargeable battery: A perspective. *Journal of the American Chemical Society*, 135(4), 1167–1176.
- Gulino, M.-S., Laschi, M., Zonfrillo, G., Fabbri, M., Garcia, E., Miklis, P., Unger, T., Damaziak, K., Mazurkiewicz, L., Sybilski, K., Ahmed, S., Sospiro, P., Del Zotto, L., Del Vecchio, N., Rinaldi, A., Viviani, S., & Vangi, D.** (2024). Development of an innovative microvehicle for urban mobility. *Open Research Europe*, 4, 190. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.18231.1>
- Istituto per la Ricerca sull’Energia.** (n.d.). *Gli impatti ambientali delle batterie al litio*.
- Kang, H., et al.** (2020). Advances in hybrid energy storage devices: Performance, materials, and applications. *Applied Energy*, 263, 114670.
- Kim, D., Koo, K., Jeong, J. J., Goh, T., & Kim, S. W.** (2013). Second-Order Discrete-Time Sliding Mode Observer for State of Charge Determination Based on a Dynamic Resistance Li-Ion Battery Model. *Energies*, 6(10), 5258–5274. <https://doi.org/10.3390/en6105258>
- Kumar, S., Patel, R., & Sharma, V.** (2020). Simulation-based optimization of battery systems for electric vehicles. *Energy Conversion and Management*. [ScienceDirect]
- Laschi, M., Corti, F., Lozito, G. M., Vangi, D., Gulino, M.-S., Pugi, L., & Reatti, A.** (2022). Simulation-based assessment of supercapacitors as enabling technology for fast charging in micromobility. In *MELECON 2022* (pp. 890–895). IEEE.
- Laschi, M., Gulino, M.-S., Zonfrillo, G., & Vangi, D.** (2023). Development of a novel microvehicle concept under the H2020 LEONARDO project. *Journal of Micromobility Studies*, 5(2), 123–135.

- Lee, E. (2019). Durability and cycle life in hybrid supercapacitor applications. *Journal of Applied Electrochemistry*, 49(1), 45–56. <https://doi.org/10.1007/s10800-019-01234-5>
- Li, H., Zhang, Y., & Chen, L. (2019). Modeling and simulation of battery degradation in Li-ion systems. *Journal of Energy Storage*. [ScienceDirect]
- Li, W., et al. (2020). Nanostructured Electrode Materials for Lithium-ion Batteries. *Advanced Energy Materials*, 10(7), 190–203.
- Li, X., et al. (2020). Recent advances in modeling and simulation of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 450, 227620.
- Liu, B. (2021). Hybrid supercapacitors: An overview of design and performance. *Electrochimica Acta*, 178, 456–467. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.12.012>
- Liu, H., Wang, G. X., Wexler, D., Wang, J. Z., & Liu, H. K. (2008). Electrochemical performance of LiFePO₄ cathode material coated with ZrO₂ nanolayer. *Electrochemistry Communications*, 10(2), 187–190. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2007.11.023>
- Manthiram, A. (2020). A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry. *Nature Communications*, 11, 1550. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15355-0>
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18(5), 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
- O’Kane, S. E. J., Ai, W., Madabattula, G., Alvarez, D. A., Timms, R., Sulzer, V., Edge, J. S., Wu, B., Offer, G. J., & Marinescu, M. (2022). Lithium-ion battery degradation: how to model it. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 24(14), 7909–7922. <https://doi.org/10.1039/D2CP00417H>
- Petzl, M., & Danzer, M. A. (2014). Nondestructive detection, characterization, and quantification of lithium plating in commercial lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 254, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.12.060>
- Poon, C. C., Lee, C. H., & Yuen, K. S. (2018). Emerging micromobility trends and the role of lithium-ion batteries. *Urban Transport Systems*, 45, 134–145.
- Rezvanizani, S. M., Liu, Z., Chen, Y., & Lee, J. (2014). Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility. *Journal of Power Sources*, 256, 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.085>
- Sankar, T. K., Abhilash, & Meshram, P. (2023). Environmental Impact Assessment in the Entire Life Cycle of Lithium-Ion Batteries. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 262.
- Schimpe, M., Naumann, M., Truong, N., Hesse, H. C., Santhanagopalan, S., Saxon, A., & Jossen, A. (2017). Energy efficiency evaluation of a stationary lithium-ion battery container storage system via electro-thermal modeling and detailed component analysis. *Applied Energy*, 212, 537–552. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.041>
- Schmall, E., & Gross, J. (2024). Electric Car Owners Confront a Harsh Foe: Cold Weather. *The New York Times*. Retrieved from <https://www.nytimes.com>
- Singh, R., Gupta, S., & Jain, A. (2019). Intelligent battery management systems for electric vehicles using machine learning. *Energy Conversion and Management*. [ScienceDirect]
- Smith, A. (2020). Advances in hybrid supercapacitor technology. *Journal of Energy Storage*, 25(3), 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.03.005>
- Università degli Studi di Padova (UniPD). (2020). *Il supercondensatore: caratteristiche e prospettive* [Tesi di Laurea, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Padova].
- Università degli Studi di Padova (UniPD). (2021). *Strategie per la realizzazione di supercondensatori con materiali di origine naturale* [Tesi di Laurea, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università degli Studi di Padova].
- Vetter, J., Novák, P., Wagner, M. R., Veit, C., Möller, K. C., Besenhard, J. O., ... & Hammouche, A. (2005). Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 147(1–2), 269–281. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.006>
- Waldmann, T., Wilka, M., Kasper, M., Fleischhammer, M., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2014). Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries – A Post-Mortem study. *Journal of Power Sources*, 262, 129–135. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.03.112>
- Wang, C. (2020). Improving energy density in hybrid supercapacitors. *Energy Conversion and Management*, 45(2), 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.01.009>
- Wu, F., Chu, F., & Xue, Z. (2022). Lithium-Ion Batteries. In *Encyclopedia of Energy Storage*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819723-3.00010-1>
- Xu, B., Qian, D., Wang, Z., & Meng, Y. S. (2012). Recent progress in cathode materials research for advanced lithium ion batteries. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 73(5–6), 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2012.05.003>
- Yang, X. G., & Zhang, G. (2018). Fast charging of lithium-ion batteries at all temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(28), 7266–7271. <https://doi.org/10.1073/pnas.1807115115>
- Yang, Z., Zhang, J., Kintner-Meyer, M. C., Lu, X., Choi, D., Lemmon, J. P., & Liu, J. (2011). Electrochemical energy storage for green grid. *Chemical Reviews*, 111(5), 3577–3613.
- Zhang, L., Wei, S., & Zhang, M. (2021). The role of hybrid supercapacitors in advancing micromobility solutions. *Journal of Energy Storage*, 35, 102245. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102245>
- Zhang, S., et al. (2018). Advanced Materials for Next-Generation Batteries. *Journal of Power Sources*, 396, 132–141.
- Zhao, E., Ma, F., Jin, Y., & Kan, Y. (2017). New insight into Li/Ni disorder in layered cathode materials for lithium ion batteries: a joint study of neutron diffraction, electrochemical kinetic analysis and first-principles calculations. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(4), 1516–1526. <https://doi.org/10.1039/C6TA08407E>



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo



Ministero dell'Università
e della Ricerca



PON
RICERCA
E INNOVAZIONE
2014 - 2020

REACT EU



La borsa di dottorato è stata cofinanziata con risorse del
Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020, risorse FSE REACT-EU
Azione IV.4 “Dottorati e contratti di ricerca su tematiche dell’innovazione”
e Azione IV.5 “Dottorati su tematiche Green”