



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale – Classe LM-31

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea di II livello

Utilizzo del metodo di formalizzazione Multi-layer
Enterprise Input-Output per lo studio delle prestazioni
tecniche, economiche e ambientali di sistemi che
integrano strategie di economia circolare.

Relatore:
Prof. ssa Arianna Alfieri

Candidato:
Sophia Pica

Corelatore:
Prof. Claudio Castiglione

Anno accademico 2025-2026

Sommario

1. Introduzione e obiettivi del progetto	1
1.1 Contesto e motivazione della tesi	1
1.2 Obiettivi della tesi	4
1.3 Confini e assunzioni	5
1.4 Struttura del documento	6
2. Stato dell'arte sul riciclo delle batterie agli ioni di litio	7
2.1 Crescita della domanda e criticità delle materie prime	7
2.2 Quadro normativo e obiettivi europei	9
2.3 Tipologie di batterie Li-ion esistenti e implicazioni per il riciclo	10
2.4 Filiera del riciclo: fasi principali e configurazioni impiantistiche	13
2.5 Raccolta, logistica e messa in sicurezza	13
2.6 Pretrattamento meccanico per la produzione di <i>black mass</i>	14
2.7 Tecnologie di riciclo: pirometallurgia, idrometallurgia e riciclo diretto	15
2.7.1 Processi pirometallurgici	15
2.7.2 Processi idrometallurgici	16
2.7.3 Riciclo diretto e approcci ibridi	17
2.8 Principali difficoltà del riciclo delle batterie Li-ion	18
2.8.1 Eterogeneità e design delle batterie	19
2.8.2 Logistica, raccolta e flussi di ritorno	19
2.8.3 Equilibrio economico e dipendenza dai prezzi dei metalli	19
2.8.4 Impatti ambientali residui	20
3. Contesto italiano, capacità di trattamento e disponibilità dei flussi a fine vita	21
3.1 Implicazioni del Regolamento (UE) 2023/1542 per l'Italia	21
3.2 Industria delle batterie in Italia: stato, investimenti e capacità pianificata	21
3.3 Filiera del riciclo in Italia: stato di sviluppo, competenze e progetti rilevanti	22
3.4 Impianti di riciclo e capacità installate: focus su Europa e Italia	23
3.5 Flussi di batterie esauste in Italia: dati CDCNPA e scalabilità	24
3.5.1 Ordine di grandezza dei flussi nazionali (portatili, industriali e veicoli)	25
3.5.2 Integrazione dei dati CDCNPA nella tesi	26
4. Impostazione metodologica	27

4.1	Ruolo del capitolo e inquadramento generale	27
4.2	Definizioni operative: “valore raggiunto” e “valore raggiungibile”	28
4.3	Necessità di un approccio “di rete”: dalla filiera lineare alla filiera come sistema	29
4.4	Metodo MEIO: fondamenti teorici e applicazione al caso di studio	29
4.5	Struttura del modello: nodi, flussi, parametri e indicatori	30
4.6	Costruzione degli scenari: dal valore raggiunto al valore raggiungibile	31
4.7	Associazione al caso di studio AMELIE: ruolo e perimetro	31
5.	Il caso studio AMELIE, partner e formalizzazione	33
5.1	Scopo del progetto	33
5.2	Obiettivi regolatori e impatti attesi	34
5.3	Contributo della tesi	35
5.4	Formalizzazione del caso di studio con il metodo MEIO	37
5.5	Tabella Resource-Activity (RA) e tabella Resource-Function (RF)	38
5.6	Scenario di industrializzazione	39
6.	Descrizione dell’esperimento e ricostruzione della filiera di riciclo	40
6.1	Perimetro dell’esperimento e assunzioni principali	41
6.2	Sequenza generale dei passaggi considerati	41
6.3	Variabilità dell’input: black mass differenti e implicazioni sui risultati	42
6.4	Fasi sperimentali	43
6.5	Estensione del perimetro e ricostruzione end-to-end della filiera: fasi a monte della black mass	46
6.6	Scaling su base annua nazionale a partire dai dati di raccolta	51
6.7	Dal recupero dei metalli alla produzione di celle: contributo del biocarbon ..	56
6.8	Adeguamento industriale alle normative UE sul riciclo delle batterie	57
7.	Risultati dell’esperimento e raccomandazioni manageriali	60
7.1	Scenari analizzati, dati e criteri di confronto	60
7.2	Risultati sul litio: confronto tra pretrattamento a microonde e assenza di pretrattamento	61
7.3	Evidenze e risultati su altri metalli	63
7.4	Hotspot e robustezza dei risultati	64

7.5	Implicazioni manageriali e di policy-making: come migliorare recupero e controllabilità della filiera con il passaporto digitale per batterie.....	64
7.6	Implicazioni per la ricerca: dalle prove di laboratorio alla scala industriale..	66
8.	Conclusioni	68
9.	Bibliografia e sitografia	73

1. Introduzione e obiettivi del progetto

1.1 Contesto e motivazione della tesi

Negli ultimi dieci, quindici anni, l'utilizzo dell'elettronica personale è esploso, sia per la quantità di dispositivi posseduti per persona, sia per la frequenza di sostituzione di questi da parte del consumatore [1]. Smartphone, laptop, dispositivi indossabili, piccoli elettrodomestici e componenti smart per la casa hanno migliorato efficienza e connettività nella quotidianità dei consumatori semplificando loro la vita; tuttavia, i progressi ottenuti negli anni hanno anche contribuito a un significativo incremento dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) [1].

Dal punto di vista del design e dell'architettura interna, si è passati da dispositivi più voluminosi e ingombranti (ma anche più resistenti) a una miniaturizzazione che ha reso i dispositivi più leggeri e pratici, ma al contempo più complessi da riparare e smontare [2]. Sebbene questa trasformazione abbia aumentato le prestazioni e l'usabilità dei dispositivi da parte degli utenti finali, ha introdotto un problema collaterale: l'obsolescenza accelerata, sia hardware che software, riducendo così sensibilmente il ciclo di vita dei prodotti [2].

Il risultato di tutto ciò si ritrova in volumi molto elevati di rifiuti complessi ricchi di plastica, magneti, batterie, metalli preziosi [1], che spesso si ritrovano mescolati, non smaltiti in maniera corretta, in percorsi non tracciati, alimentando la catena dell'inquinamento [1].

È fondamentale essere consapevoli che le batterie ad oggi sono il cuore chimico della rivoluzione elettrica, le stesse microcelle che alimentano smartphone, laptop, utensili vari, muovono anche bici, monopattini elettrici, scooter e automobili [4]. Proprio per questa ampia adozione, le batterie assumono un ruolo strategico nella transizione verso una mobilità ed un'economia più sostenibili [4].

Questa transizione, trainata dall'urgenza di ridurre le emissioni di CO₂ e migliorare la qualità dell'aria nelle città [3], ha posto anche i powertrain elettrici (l'insieme di componenti responsabili del movimento dell'auto, come batteria, inverter, motore elettrico e trasmissione) al centro del dibattito tra decisori pubblici, industria e comunità scientifica, in termini di prestazioni, costi, sostenibilità e gestione fine vita [4].

Le auto elettriche eliminano le emissioni locali di NO_x e particolato, oltre a ridurre in modo significativo la CO₂ prodotta dallo scarico delle automobili a combustione [3]. Tuttavia, le automobili elettriche, ed in generale tutti i veicoli elettrici, non possono essere considerati completamente “a impatto zero” poiché spostano gran parte dell’impronta ecologica su fasi come la produzione (estrazione e lavorazione di materiali come litio, nichel, cobalto e grafite; assemblaggio delle celle) e lo smaltimento a fine ciclo di vita (raccolta, messa in sicurezza e riciclo) [3]. A determinare il bilancio ambientale complessivo delle batterie EV¹ concorrono la composizione del mix elettrico di ricarica (cioè la quota di rinnovabili e fonti fossili con cui è prodotta l’energia utilizzata), la vita utile in termini di anni e cicli, le necessità di manutenzione e l’eventuale reimpiego in applicazioni di “second life” [4].

Sul fronte ambientale, le criticità per la produzione delle batterie non riguardano solo l’emissione di CO₂ [10]; l’estrazione dei metalli strategici può coinvolgere aree idricamente stressate, con rischi per suolo e acque [7], [20]. La raffinazione dei metalli è particolarmente energivora, gli elettroliti fluorurati e il PVDF² richiedono cautele HSE³ specifiche; in filiera logistica [6] e negli impianti di trattamento serve prevenire eventi termici (thermal runaway) [5].

Sul fronte sociale ed economico, la dipendenza da pochissime aree di approvvigionamento rende i mercati volatili [7], le forniture particolarmente costose (costi che si ribaltano sul prodotto finale, e quindi sul consumatore), e fa sì che si crei un rischio di fornitura [8].

Emergono chiaramente due dimensioni complementari del medesimo fenomeno: da un lato, le batterie fanno sì che le emissioni di inquinanti siano ridotte al minimo durante l’utilizzo del dispositivo (in questo caso parliamo solo delle batterie che alimentano veicoli elettrici) [4], dall’altro lato, produrre queste batterie produce altrettanto inquinamento, come anche lo smaltimento, se mal gestito o addirittura non gestito [3].

I flussi di RAEE (Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) aumentano di giorno in giorno, molto più in fretta di quanto vengano messe in piedi nuove infrastrutture di raccolta, che sono ancora insufficienti [9], senza considerare che se la batteria dovesse rimanere

¹ Electric vehicle

² Fluoruro di Polivinilidene, è un fluoropolimero termoplastico ad alte prestazioni

³Health, Safety, and Environment (Salute, Sicurezza e Ambiente). Rappresenta l’approccio aziendale integrato volto a proteggere la salute dei lavoratori, garantire la sicurezza sul luogo di lavoro e minimizzare l’impatto ambientale delle attività produttive, in conformità con le normative vigenti

“intrappolata” all’interno del dispositivo che la ospita, il recupero diventa ancora più complicato da gestire [9].

Per quanto detto sopra, giungiamo alla conclusione che deve essere attuata una transizione non solo verso l’elettrico, ma questa deve essere anche una transizione in chiave circolare.

Per procedere lungo il percorso di una transizione green, che guarda all’economia circolare, è un requisito fondamentale che i prodotti siano progettati in modo tale da poter essere smontati e riparati con facilità; questa caratteristica contribuirebbe significativamente a ridurre la quantità di rifiuti generati e ad aumentare la sostenibilità del ciclo di vita dei materiali [10]. Parallelamente, sarebbe indispensabile implementare sistemi di tracciabilità più accurati lungo l’intera filiera produttiva, prolungare quanto possibile la durata delle celle e ottimizzare il riciclo dei materiali critici, quelli la cui disponibilità o gestione rappresenta una sfida strategica [10].

A tal proposito, nel 2023 l’Unione Europea ha introdotto un nuovo quadro normativo dedicato alla gestione delle batterie e dei relativi rifiuti: il Regolamento (UE) 2023/1542 [11]. Questa normativa, che sostituisce la precedente direttiva in materia, è direttamente applicabile in tutti gli Stati membri e ridefinisce gli standard della filiera spingendola verso obiettivi di sostenibilità più ambiziosi, puntualmente misurabili e in linea con le necessità ambientali [11].

Il fulcro del regolamento risiede in un principio tanto essenziale quanto chiaro: le batterie devono essere progettate, prodotte, raccolte e riciclate in un’ottica di minimizzazione dei danni ambientali e riduzione della dipendenza dalle materie prime importate da paesi extraeuropei [11]. Per raggiungere questo traguardo, vengono stabiliti stringenti obblighi di recupero dei materiali contenuti nelle batterie esauste. In particolare, si prevede che entro il 2027 dai processi di riciclo si debba ottenere almeno il 90% di cobalto, nichel e rame, percentuale che salirà al 95% entro il 2031 [11]. Contestualmente, per quanto riguarda il litio, i tassi di recupero prefissati sono pari ad almeno il 50% entro il 2027 e all’80% entro il 2031 [11]. Oltre a questi obiettivi quantitativi, sarà necessario anche certificare concretamente quale proporzione dei materiali riciclati viene effettivamente reintrodotta nei cicli produttivi [11].

Accanto a queste disposizioni sui tassi di recupero, il regolamento introduce anche l’obbligo di includere una percentuale minima di contenuto riciclato nelle nuove batterie destinate al mercato europeo [11]. A partire dal 2031, alcune categorie di batterie dovranno incorporare almeno il 16% di cobalto e il 6% sia di litio che di nichel ottenuti da fonti riciclate [11]. Questi

valori subiranno un ulteriore incremento entro il 2036, rafforzando così progressivamente l'impiego di materiali recuperati rispetto a quelli estratti ex-novo [11].

Per i produttori e gli operatori di filiera questo significa ripensare il fine vita come una nuova miniera urbana, integrando soluzioni industriali scalabili in grado di trattare volumi crescenti e chimiche⁴ diverse (NMC, LCO, LFP) [12].

In Italia, come in Europa, si sta aprendo una concreta opportunità di sviluppo industriale legata alla nascita e al potenziamento della filiera del fine vita delle batterie [12]. La crescita dei volumi di batterie a fine vita, sia da elettronica di consumo (quali smartphone, laptop, etc.), sia da mobilità elettrica, costituisce un fabbisogno di capacità lungo tutta la catena (pretrattamento, pirometallurgia/idrometallurgia, purificazione, etc.) [12].

In questo scenario, si collocano iniziative di ricerca, sviluppo e innovazione che mettono a sistema competenze di laboratorio e capacità impiantistiche [13], [14] per dimostrare l'esistenza della possibilità di recuperare in modo sicuro ed economicamente sostenibile litio, nichel, cobalto, rame, alluminio e grafite, riducendo al contempo l'impatto ambientale rispetto alle fonti primarie [15].

1.2 Obiettivi della tesi

L'obiettivo generale della tesi è quello di valutare in modo integrato, quanto e come il riciclo delle batterie a ioni di litio consenta di recuperare materiali/metalli critici, con quali consumi energetici, e quali flussi di scarto. Inoltre, si analizzano la scalabilità e la convenienza industriale del processo validato in scala di laboratorio.

A partire da questo quadro generale, il lavoro si articola nei seguenti obiettivi specifici:

1. Bilanci di massa: si ricostruiscono i bilanci di massa dell'intero processo, tracciando tutti i flussi in ingresso (batterie a fine vita, *black mass*⁵, reagenti, ecc.) e in uscita (prodotti, sottoprodotti, scarti, effluenti liquidi e gassosi, residui solidi, ecc.).

⁴ Con il termine tecnico "chimiche" ci si riferisce alla specifica composizione dei materiali attivi che costituiscono gli elettrodi (in particolare il catodo) e l'elettrolita della cella. Sebbene il principio di funzionamento basato sull'intercalazione degli ioni di litio rimanga invariato, la variazione degli elementi metallici utilizzati (es. LFP, NMC, NCA) determina le proprietà macroscopiche della batteria, quali densità energetica, stabilità termica e vita utile.

⁵ La black mass è il prodotto della separazione meccanica e della setacciatura delle batterie esauste, contenente la maggior parte dei materiali attivi catodici e anodici [19]

2. Rese e tassi di recupero: si determinano le rese di processo e i tassi di recupero dei principali materiali/elementi target: Li, Ni, Co, Mn, Cu, Al e grafite.
3. Gestione degli scarti: si identificano e quantificano le diverse tipologie di scarto (ad es. acque di processo e di filtrazione, residui, frazioni non valorizzabili) e si valutano possibili opzioni di riciclo/riuso, sia all'interno del processo stesso sia in filiere alternative. Per le frazioni residue non recuperabili, si procede alla classificazione come rifiuto da smaltire e si analizzano le relative implicazioni.
4. Scalabilità e convenienza economica: si valuta la scalabilità del processo validato in scala di laboratorio, stimandone la fattibilità di trasferimento a scala industriale e analizzandone la convenienza economica.
5. Allineamento ai requisiti normativi: si verifica l'allineamento del processo ai requisiti normativi applicabili, con particolare riferimento ai target di efficienza e di recupero dei materiali.

1.3 Confini e assunzioni

L'analisi definisce confini di sistema End-of-Life-to-gate (EoL-to-gate), in linea con l'impostazione del Life Cycle Assessment (LCA) secondo ISO 14040:2006 [16]. A differenza della trattazione LCA "classica", che ricostruisce il ciclo di vita a partire dalla culla (produzione del bene) fino all'uso e alla fine vita del bene (cradle-to-grave) [16], in questo lavoro il sistema viene osservato a partire dalla fine vita della batteria (EoL). Il perimetro comprende quindi le fasi di raccolta e trattamento/riciclo, fino al "gate", inteso come uscita dal processo di recupero sotto forma di materiali e scarti classificati. In questa prospettiva, il "gate" rappresenta anche il punto di ingresso dei materiali recuperati in una nuova catena del valore (nuova "vita" del litio, nichel, cobalto, rame, alluminio, grafite, ecc.) [16].

All'interno dei confini sono inclusi anche i consumi di supporto al processo (ad es. energia elettrica, acqua e altri servizi ausiliari) e le perdite di processo [16]; non rientrano invece, le fasi precedenti di produzione e utilizzo della batteria.

I dati utilizzati provengono da prove sperimentali in scala di laboratorio svolte nell'ambito del progetto [13], [14] e da fonti tecniche coerenti; dove necessario, si introducono assunzioni esplicite e si conducono analisi di sensitività per valutarne l'impatto sui risultati [16].

1.4 Struttura del documento

A seguire è descritta la struttura del documento, questo è organizzato in sette capitoli.

- Capitolo 1: introduzione all'argomento di tesi e motivazioni dello studio;
- Capitolo 2: review della letteratura, descrizione dello stato dell'arte;
- Capitolo 3: contesto italiano, capacità di trattamento e disponibilità dei flussi a fine vita;
- Capitolo 4: impostazione metodologica della tesi;
- Capitolo 5: il caso di studio AMELIE, partner e formalizzazione;
- Capitolo 6: descrizione dell'esperimento e ricostruzione della filiera di riciclo;
- Capitolo 7: risultati dell'esperimento;
- Capitolo 8: conclusioni;

2. Stato dell'arte sul riciclo delle batterie agli ioni di litio

La letteratura riguardante il riciclo delle batterie agli ioni di litio tratta diverse tematiche:

- Dinamiche di domanda;
- Modalità/problematiche di approvvigionamento delle materie;
- Quadro normativo;
- Aspetti tecnici;
- Valutazioni su impatti ambientali ed economici.

Il capitolo è organizzato secondo una progressione dal generale al particolare: si parte dalle ragioni che hanno reso il riciclo rilevante e si conclude con gli obiettivi e i vincoli fissati dalla normativa europea. Nel capitolo si descrivono le caratteristiche delle batterie che determinano la composizione dei flussi e le scelte di processo. Successivamente, si presentano la filiera, le principali tecnologie di trattamento esistenti. La parte conclusiva del capitolo collega lo stato dell'arte alle implicazioni industriali, utili ad inquadrare la scalabilità del caso di studio.

2.1 Crescita della domanda e criticità delle materie prime

Negli ultimi anni, le batterie agli ioni di Litio (Li-ion) sono diventate un riferimento fondamentale per la mobilità elettrica (automobili, scooter, monopattini, etc.) [17] ed i sistemi di accumulo stazionario (sistemi il cui scopo principale è immagazzinare grandi quantità di energia per poi erogarla con scariche di lunga durata) [66], sostituendo man mano quelle che sono le tecnologie più tradizionali (piombo-acido, nichel-cadmio) [17]. La letteratura evidenzia come nei prossimi anni, scenario 2030-2035, la domanda per questo tipo di celle Li-ion sia destinata a crescere sempre di più, quasi fino ad un ordine di grandezza superiore rispetto alla domanda del 2020 [17], [66].

Questo crescente aumento di domanda si traduce in una forte richiesta da parte dei produttori di batterie, per le materie prime critiche, come litio, nichel, cobalto, manganese, etc. [20] Tutti questi elementi sono estratti in pochissime aree del pianeta, in un numero limitato di Paesi, spesso concentrati in aree geografiche specifiche (es. litio in Sud America e Australia, cobalto nella Repubblica del Congo, nichel in Indonesia e Russia [20]), aumentando i rischi geopolitici, sfruttamento delle popolazioni che abitano quelle zone, volatilità dei prezzi e impatti socio-ambientali [18], [19]. Nella Figura 1 è rappresentata parte della dislocazione globale delle attività estrattive relative ai materiali critici in esame.



Figura 1: Aree del pianeta in cui sono presenti i materiali critici (Fonte: Elaborazione sui dati MED & Italian Energy Report)

La dipendenza dall'importazione delle materie prime critiche, per un Paese come l'Italia, povero di risorse minerarie primarie, è un potenziale collo di bottiglia, sia per la transizione energetica, sia a livello di spese da sostenere [17]. La letteratura sottolinea che in assenza di strategie valide di economia circolare [17], il rapido aumento della domanda di batterie, rischia di tradursi in un aumento di emissioni climalteranti, consumo di acqua, etc. [20], soprattutto nelle fasi estrattive localizzate nei paesi extra-europei [17], [20].

Per quanto elencato sopra, il tema del riciclo delle batterie a fine vita è un tema centrale per:

- Ridurre la dipendenza da materie prime critiche (litio, cobalto, nichel, manganese) [21];

- Attenuare i rischi di approvvigionamento [21];
- Diminuire l'impronta ambientale complessiva della filiera delle batterie [21].

2.2 Quadro normativo e obiettivi europei

L'Unione Europea circa tre anni fa ha pubblicato il Regolamento (UE) 2023/1542 sulle batterie e rifiuti di batterie [22], [23], il quale definisce un quadro normativo molto più stringente di quello che era la precedente Direttiva 2006/66/CE [24].

Il passaggio da direttiva a regolamento europeo costituisce un indicatore significativo dell'urgenza e della centralità del tema, infatti la direttiva europea non è direttamente applicabile: richiede un atto nazionale di recepimento (trasposizione), e serve per armonizzare le legislazioni nazionali, lasciando flessibilità ai singoli Stati [24]; molto diverso è invece il regolamento europeo, questo è applicato in maniera immediata e diretta a tutti gli Stati, e soprattutto entra in vigore automaticamente una volta pubblicato nella Gazzetta Ufficiale dell'UE [24].

Il Regolamento (UE) 2023/1542 introduce, tra gli altri, quattro elementi chiave:

- Obblighi di responsabilità estesa del produttore (EPR) lungo l'intero ciclo di vita [22];
- Obiettivi minimi di efficienza di riciclo per le diverse tipologie di batterie [23];
- Target specifici di recupero di singoli metalli (litio, cobalto, nichel, rame, piombo) [11];
- Requisiti su contenuto minimo di materiale riciclato e introduzione del passaporto digitale per le batterie (battery passport) [22], [62].

Per le batterie a litio ed i loro componenti, il regolamento prevede il raggiungimento di un'efficienza di riciclo per peso pari ad almeno il 65% entro il 31 dicembre 2025 [23], valore che dovrà aumentare al 70% entro il 2030 [22].

Sono fissati inoltre target di riciclo dei singoli elementi: ad esempio, per Cu, Co e Ni si richiedono tassi di recupero del 90% entro il 2025 e del 95% entro il 2030 [25], mentre per il litio (Li) i target passano da circa il 50% entro il 2027, all'80% entro il 2030 [22], [23].

La fissazione di target di recupero per i singoli elementi è legata anche al fatto che il territorio dell'Unione Europea non è particolarmente ricco di materie prime critiche [22]; di

conseguenza, la necessità di ridurre la dipendenza da Paesi extra-europei attraverso strategie di riciclo si fa sempre più concreta [25].

Questi obblighi normativi stanno influenzando sia la progettazione sia l'operatività degli impianti di trattamento, che devono dimostrare il rispetto dei target attraverso dati tracciabili e bilanci di massa [21]; inoltre, la normativa spinge verso una riflessione sulla progettazione delle celle a monte, favorendo architetture che facilitino la separazione e il recupero dei componenti [17], [26].

2.3 Tipologie di batterie Li-ion esistenti e implicazioni per il riciclo

È utile richiamare quali sono i vari tipi di batterie agli ioni di litio che esistono, che sono utilizzate oggi, e le loro composizioni.

Dal punto di vista della chimica del catodo, le famiglie più diffuse sono:

- **NMC (Litio-Nichel-Manganese-Cobalto) e NCA (Litio-Nichel-Cobalto-Alluminio)**

Sono le batterie più utilizzate nei veicoli elettrici di ultima generazione [28]. Presentano elevata densità di energia e buone prestazioni in termini di autonomia, ma contengono quantità significative di nichel e, in misura variabile, di cobalto, elementi di alto valore economico e critici dal punto di vista dell'approvvigionamento [27]. All'aumentare del tenore in nichel (ad es. NMC 811) cresce la densità energetica, ma aumentano anche le esigenze di controllo termico e di sicurezza [19], [28].

- **LFP (Litio-Ferro-Fosfato)**

È una chimica sempre più diffusa, soprattutto in veicoli elettrici di fascia medio-bassa e in applicazioni stazionarie [66]. Rispetto a NMC/NCA presenta densità di energia inferiore, ma offre una maggiore stabilità termica e sicurezza, una vita utile più lunga e l'assenza di cobalto e nichel [28]. Dal punto di vista del riciclo ciò implica un minor valore intrinseco della *black mass* in termini di metalli critici, ma una maggiore robustezza e durata in esercizio [28], [66].

- **LCO (Litio-Ossido di Cobalto)**

Storicamente molto utilizzata nell'elettronica portatile (laptop, smartphone), è caratterizzata da un'elevata densità energetica e da un alto contenuto di cobalto [28]. La

diffusione di questa chimica nei veicoli elettrici è limitata, ma resta rilevante nei flussi di rifiuti provenienti da dispositivi elettronici [65].

- **Altre chimiche: LMO (Litio-Ossido di Manganese), misto NMC/LMO, LTO (Litio-Titanato), ecc.**

Sono presenti in applicazioni specifiche (ad esempio elevata potenza, basse temperature, lunga vita ciclica), spesso in combinazione con le chimiche sopra citate. La loro presenza contribuisce ad aumentare l'eterogeneità complessiva delle batterie a fine vita [65].

Dal lato dell'anodo, la soluzione più comune è la grafite (talvolta con piccole frazioni di silicio) [30], i collettori di corrente sono tipicamente in rame (anodo) e alluminio (catodo) [28]. Completano la cella un elettrolita organico a base di sali di litio in solventi carbonati e un separatore polimerico (poliolefine) [29].

Questi elementi strutturali sono ricorrenti nelle diverse famiglie chimiche e rappresentano, insieme al catodo, la base della futura *black mass* [28], [29], [30].

Le differenze tra le diverse chimiche si traducono in:

- composizioni elementari molto diverse (rapporti tra Li, Co, Ni, Mn, Fe, P, ecc.) [28];
- valori economici dei metalli recuperabili molto differenti [31];
- diversa selettività richiesta nei processi metallurgici [19], [31].

Di conseguenza, la composizione della batteria in ingresso condiziona sia i flussi in ingresso per la filiera del riciclo, sia la progettazione del flusso di processo [19].

La Tabella 1 fornisce un quadro riassuntivo delle batterie agli ioni di litio, illustrandone la composizione chimica, i principali campi di applicazione, l'evoluzione storica e le caratteristiche tecniche peculiari [28], [29].

Chemistry	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Manganese Oxide	Lithium Nickel Manganese Oxide	Lithium Iron Phosphate	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide	Lithium Titanate Oxide
Short form	Li-cobalt	Li-manganese	NMC	Li-phosphate	Li-aluminum	Li-titanate
Abbreviation	LiCoO ₂ (LCO)	LiMn ₂ O ₄ (LMO)	LiNiMnCoO ₂ (NMC)	LiFePO ₄ (LFP)	LiNiCoAlO ₂ (NCA)	Li ₂ TiO ₃ (common) (LTO)
Nominal voltage	3.60V	3.70V (3.80V)	3.60V (3.70V)	3.20, 3.30V	3.60V	2.40V
Full charge	4.20V	4.20V	4.20V (or higher)	3.65V	4.20V	2.85V
Full discharge	3.00V	3.00V	3.00V	2.50V	3.00V	1.80V
Minimal voltage	2.50V	2.50V	2.50V	2.00V	2.50V	1.50V (est.)
Specific Energy	150–200Wh/kg	100–150Wh/kg	150–220Wh/kg	90–120Wh/kg	200-260Wh/kg	70–80Wh/kg
Charge rate	0.7–1C (3h)	0.7–1C (3h)	0.7–1C (3h)	1C (3h)	1C	1C (5C max)
Discharge rate	1C (1h)	1C, 10C possible	1–2C	1C (25C pulse)	1C	10C possible
Cycle life (ideal)	500–1000	300–700	1000–2000	1000–2000	500	3,000–7,000
Thermal runaway	150°C (higher when empty)	250°C (higher when empty)	210°C (higher when empty)	270°C (safe at full charge)	150°C (higher when empty)	One of safest Li-ion batteries
Maintenance	Keep cool; store partially charged; prevent full charge cycles, use moderate charge and discharge currents					
Packaging (typical)	18650, prismatic and pouch cell	prismatic	18650, prismatic and pouch cell	26650, prismatic	18650	prismatic
History	1991 (Sony)	1996	2008	1996	1999	2008
Applications	Mobile phones, tablets, laptops, cameras	Power tools, medical devices, powertrains	E-bikes, medical devices, EVs, industrial	Stationary with high currents and endurance	Medical, industrial, EV (Tesla)	UPS, EV, solar street lighting
Comments	High energy, limited power. Market share has stabilized.	High power, less capacity; safer than Li-cobalt; often mixed with NMC to improve performance.	High capacity and high power. Market share is increasing. Also NCM, CMN, MNC, MCN	Flat discharge voltage, high power low capacity, very safe; elevated self-discharge.	Highest capacity with moderate power. Similar to Li-cobalt.	Long life, fast charge, wide temperature range and safe. Low capacity, expensive

Tabella 1: Quadro sinottico delle tecnologie a base di litio (Fonte: Battery University [28])

2.4 Filiera del riciclo: fasi principali e configurazioni impiantistiche

La filiera del riciclo delle batterie agli ioni di litio è generalmente descritta in letteratura come articolata in quattro blocchi principali [17], [19], che possono essere combinati tra loro in configurazioni diverse a seconda della tecnologia e del modello industriale adottato:

1. Raccolta, logistica e messa in sicurezza [17], [19];
2. Eventuali pretrattamenti e produzione di *black mass* [17], [19];
3. Processi metallurgici di recupero [17], [19];
4. Raffinazione dei prodotti e loro reimmissione a valle [17], [19].

Nella Figura 2 la rappresentazione grafica ad alto livello della filiera come appena descritta.

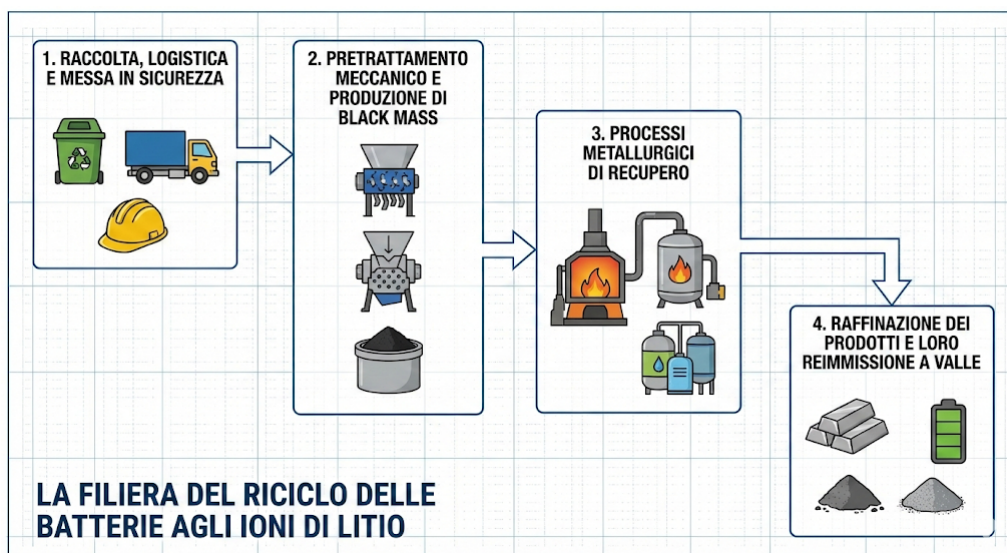


Figura 2: Rappresentazione grafica (ad alto livello) della filiera

2.5 Raccolta, logistica e messa in sicurezza

Le batterie vengono classificate come rifiuti pericolosi per il loro contenuto di elettrolita organico infiammabile, a causa di possibili residui di carica, per la presenza di metalli e composti parzialmente nocivi [26]. Questa classificazione impone quindi alle batterie requisiti specifici per il trasporto (imballaggi, etichettatura, compatibilità con normativa ADR⁶) e per le condizioni di stoccaggio intermedio [5], [6], [19].

⁶ Accord Dangereuses Route è un accordo europeo del 1957, aggiornato ogni due anni (attualmente 2025), che disciplina il trasporto stradale di merci pericolose per garantire la sicurezza.

Nella pratica industriale, prima di qualsiasi trattamento meccanico è spesso prevista una messa in sicurezza che può includere:

- Scarica elettrica controllata delle celle/moduli [17];
- Inertizzazione con gas o soluzioni (ad esempio salamoia) per ridurre il rischio di cortocircuito [19];
- Rimozione di componenti esterni facilmente separabili (cablaggi, rivestimenti) [17], [19].

La letteratura sottolinea come questa fase rappresenti un costo non trascurabile [20], e ad oggi è sottoposta a processi di ottimizzazione per cercare di diminuirne l'impatto economico [20], in particolare per i veicoli elettrici, dove le batterie risultano più voluminose, di composizione eterogenea e spesso non sono progettate per essere disassemblate rapidamente [19].

2.6 Pretrattamento meccanico per la produzione di *black mass*

Il pretrattamento meccanico per la produzione di *black mass* è definito come l'insieme dei processi fisici volti a separare i materiali costituenti la batteria in base alle loro proprietà macroscopiche (densità, proprietà magnetiche, conduttività), senza alterarne la struttura chimica [19]. Operativamente, questa fase prevede che i moduli o le celle vengano smontati nei loro componenti principali e successivamente tritati e macinati in ambienti controllati (es. atmosfera inerte o ambiente criogenico, a seconda del processo) [17], [32].

Gli obiettivi principali di questa fase sono:

- Ridurre la dimensione dei componenti [17];
- Separare le principali frazioni (metalli ferrosi, alluminio, rame, frazioni plastiche) [19];
- Concentrare il materiale elettroattivo in una polvere fine, la *black mass* [32].

La *black mass* è costituita prevalentemente da:

- Materiale catodico (NMC, NCA, LFP, LCO, ecc.) [17];
- Materiale anodico (grafite) [19];
- Leganti polimerici [19];

- Additivi conduttivi (ad es. nerofumo) [17];
- Residui di elettrolita e di separatore finemente dispersi [32].

Le sue caratteristiche, quali, composizione elementare e chimica, distribuzione granulometrica, contenuto di impurità metalliche (Fe, Al, Cu) e organiche, che derivano direttamente dalla composizione della cella stessa, influenzano in maniera determinante:

- L'efficienza delle successive fasi metallurgiche (pirometallurgia, idrometallurgia, riciclo diretto) [17];
- I consumi specifici di reagenti ed energia [32];
- La qualità dei prodotti finali ottenibili [19].

In particolare, la presenza di chimiche diverse (ad esempio NMC e LFP trattate insieme) nella stessa *black mass* rende necessari: schemi di trattamento più complessi (sequenze di lisciviazione e separazione mirate), oppure strategie di separazione a monte dei flussi [32].

2.7 Tecnologie di riciclo: pirometallurgia, idrometallurgia e riciclo diretto

A valle del pretrattamento, il flusso di *black mass* può essere trattato secondo tre famiglie principali di processi: pirometallurgici, idrometallurgici e di riciclo diretto [17].

Tali vie possono essere applicate singolarmente o in configurazioni ibride (ad es. pirometallurgia preliminare e idrometallurgia di raffinazione) a seconda del modello industriale adottato [20], [26].

2.7.1 Processi pirometallurgici

I processi pirometallurgici trattano la *black mass* ad alte temperature (fino a 1200–1500 °C), spesso in forni a crogiolo, forni ad arco o forni a bagno fuso [19]. In presenza di fondenti e agenti riducenti, il materiale elettroattivo viene trasformato in:

- Una lega metallica ricca in Co, Ni e Cu (talvolta anche Fe) [26];
- Una scoria vetrificata, contenente principalmente Al, Mn, Ca e parte del litio [19];
- Una frazione di fumi che deve essere trattata in sistemi di abbattimento dedicati [20].

I principali vantaggi di questa via sono:

- Robustezza rispetto all'eterogeneità del feed⁷: il forno può trattare miscele di chimiche diverse (NMC, NCA, LCO, LFP) e formati differenti (celle, moduli, *black mass*) [17], [19];
- Affidabilità tecnologica, poiché si tratta di processi derivati dalla metallurgia consolidata di rame e nichel [17];
- Buoni tassi di recupero per Co, Ni e Cu, specialmente quando la metallurgia a valle è ben integrata [20].

Gli svantaggi principali evidenziati dalla letteratura riguardano:

- Consumi energetici elevati dovuti alle alte temperature e alla necessità di mantenere i forni in esercizio continuo [19], [20];
- Difficoltà di recupero efficiente del litio, spesso concentrato nella scoria e non sempre valorizzato [17], [19];
- Produzione di scorie e fumi che richiedono gestione e trattamento appropriati [17];
- Necessità di step idrometallurgici successivi per separare Co, Ni, Mn e altri metalli dalla lega ottenuta [19].

Analisi LCA (Life Cycle Assessment) e tecno-economiche mostrano che le prestazioni ambientali dei processi pirometallurgici dipendono in modo critico da:

- Composizione del mix energetico utilizzato [18];
- Grado di recupero energetico interno (es. calore dai fumi) [20];
- Integrazione con fasi idrometallurgiche efficienti per la valorizzazione del litio e di metalli a minor tenore [18], [19].

2.7.2 Processi idrometallurgici

Nei processi idrometallurgici la *black mass* viene sottoposta a lisciviazione in mezzi acquosi (acidi minerali come H₂SO₄ o HCl, acidi organici, miscele con agenti riducenti), operando in condizioni controllate di temperatura, pH e rapporto solido/liquido [19]. Lo scopo di questa

⁷ "feed" (o alimentazione) è il materiale grezzo che entra nel forno o nel reattore.

fase è solubilizzare selettivamente i metalli di interesse (Li, Co, Ni, Mn) lasciando in soluzione o nel residuo solido le specie meno preziose o impurità [19].

La letteratura mostra come, opportunamente tarato, il processo idrometallurgico consenta:

- Elevati tassi di recupero di Co, Ni e Mn (>90–95% nei casi migliori) [19], [32];
- Un recupero del litio più efficiente rispetto alla pirometallurgia, dove questo metallo tende a disperdersi nelle scorie [17], [19];
- Una significativa riduzione dei consumi energetici diretti, poiché le temperature di esercizio sono molto inferiori a quelle dei forni pirometallurgici [20], [32].

Tuttavia, i processi pirometallurgici richiedono l'impiego di quantità non trascurabili di reagenti (acidi, basi, agenti precipitanti, solventi organici), generando flussi di reflui liquidi che devono essere trattati o riciclati all'interno del processo. Le criticità più frequentemente discusse includono:

- Gestione dei fanghi di neutralizzazione e dei residui solidi prodotti dalle precipitazioni selettive [17], [32];
- Rischio di trasferire parte dell'impatto ambientale dall'energia ai consumi chimici [18];
- Complessità dei diagrammi di flusso, con numerose unità operative (reattori di lisciviazione, colonne di estrazione, filtri, ecc.) che aumentano costi CAPEX/OPEX e necessità di controllo fine di processo [20].

2.7.3 Riciclo diretto e approcci ibridi

Il riciclo diretto mira a conservare, quanto più possibile, la struttura e la composizione del materiale catodico, evitando la completa dissoluzione dei metalli in soluzione e la loro successiva ricostruzione [26]. Il processo operativo prevede:

1. Separazione del materiale catodico dal supporto (collettore di corrente in alluminio) e dagli altri componenti della *black mass* [20], [32];
2. Rimozione di impurità (legante, elettrolita residuo, conduttori) [21];
3. Rigenerazione del catodo tramite trattamenti termici e chimici (ad esempio, relitiazione e correzione della stechiometria) per ripristinare le prestazioni elettrochimiche [17], [26].

Gli studi comparativi indicano che, se correttamente implementato, il riciclo diretto può garantire:

- Consumi energetici specifici più bassi tra le tre famiglie di processi [18], [26];
- Una drastica riduzione dei passaggi di processo, eliminando la necessità di ricostruire il precursore a partire da soluzioni metalliche [17];
- Potenziali costi operativi inferiori rispetto alle catene pirometallurgiche /idrometallurgiche complete, soprattutto per batterie ad alto contenuto di Co/Ni [20].

D'altra parte, le criticità che emergono in modo ricorrente sono:

- Forte dipendenza dalla specifica chimica del catodo (NMC, NCA, LCO, ecc.), che richiede una separazione accurata dei flussi in ingresso [21];
- Necessità di controllo molto fine della composizione e della microstruttura del materiale rigenerato, per garantire prestazioni comparabili a quelle di un materiale “vergine” [26], [30];
- Limitata scalabilità industriale, con la maggior parte degli studi fermata a scala di laboratorio o pilota [20], [30].

Per superare i limiti delle singole tecnologie, la letteratura recente propone schemi ibridi: questi combinano un pretrattamento meccanico o fisico-chimico avanzato per purificare i materiali con fasi successive di rigenerazione diretta o idrometallurgia mirata, ottimizzando così il bilancio energetico ed economico complessivo [17], [32].

2.8 Principali difficoltà del riciclo delle batterie Li-ion

La letteratura evidenzia un insieme di criticità che, pur a fronte di crescenti pressioni normative e dell'elevato potenziale del riciclo delle batterie agli ioni di litio, ne limitano l'effettiva maturazione industriale [17], [19], [26]. Le principali criticità sono sintetizzate di seguito:

- Eterogeneità e design delle batterie [19], [20], [30];
- Logistica, raccolta e flussi di ritorno [17], [20], [31];
- Equilibrio economico e dipendenza dai prezzi dei metalli [20], [21], [32];
- Impatti ambientali residui [17], [18], [26].

2.8.1 Eterogeneità e design delle batterie

Nel mercato coesistono numerose chimiche: NMC con diverse stechiometrie, NCA, LCO, LFP, LMO; e formati: celle cilindriche, prismatiche, pouch [30]. In molti casi, le batterie non sono progettate secondo criteri di progettazione orientata al riciclo, rendendo complesso e costoso il disassemblaggio [19], [26].

Questa eterogeneità si traduce in:

- Difficoltà nel separare chimiche diverse prima del trattamento [19], [30];
- Maggiore variabilità nella composizione della *black mass* [17], [18];
- Necessità di processi più “robusti” ma meno ottimizzati (es. pirometallurgia) o di sofisticati sistemi di selezione e tracciabilità [19], [20], [22].

2.8.2 Logistica, raccolta e flussi di ritorno

I volumi di batterie provenienti da veicoli elettrici (EV) a fine vita sono al momento ancora contenuti, riflettendo la recente diffusione della mobilità elettrica; di conseguenza, una quota significativa dei materiali attualmente trattati negli impianti è costituita da scarti di produzione [17]. Prima di giungere al riciclo finale, inoltre, una parte delle celle o dei moduli ritenuti idonei può essere destinata a una seconda vita in applicazioni stazionarie (come batterie per accumulare energia da fotovoltaico, in piccoli impianti stazionari, in sistemi di backup) di accumulo energetico, prolungandone il ciclo utile [26], [66].

Tuttavia, la dislocazione geografica non capillare degli impianti di trattamento e i rigidi vincoli normativi sul trasporto comportano percorrenze rilevanti, traducendosi in costi logistici elevati e impatti ambientali aggiuntivi [17]. L’ottimizzazione della rete di raccolta è quindi indicata dalla letteratura come un fattore chiave per migliorare la sostenibilità complessiva della filiera e ridurre l'impronta carbonica della logistica inversa [18].

2.8.3 Equilibrio economico e dipendenza dai prezzi dei metalli

La redditività dei processi di riciclo è strettamente legata alla specifica "chimica" della cella, termine con cui nel settore si identifica la composizione del materiale catodico e il suo contenuto di metalli ad alto valore (come cobalto e nichel) [17]. Per chimiche ad alto contenuto di cobalto e nichel, che possiamo definire “ricche” (es. NMC e NCA), il valore intrinseco della

black mass è sufficiente a sostenere processi di riciclo molto complessi [20]. Viceversa, per chimiche meno ricche di metalli ad alto valore, come le celle LFP, il modello di business è più fragile [26], e si richiede maggiore valorizzazione di altri elementi come grafite, fosforo, frazioni plastiche, corrente di litio [20].

Inoltre, le fluttuazioni dei prezzi delle materie prime critiche rendono difficile la pianificazione di investimenti, soprattutto per impianti in grande scala, i quali, devono operare con orizzonti temporali ampi [20].

2.8.4 Impatti ambientali residui

Sebbene esista un ampio consenso scientifico sul fatto che il riciclo rappresenti l'opzione preferibile rispetto allo smaltimento in discarica, le analisi LCA (Life Cycle Assessment) evidenziano come i benefici ambientali netti non siano scontati né automatici [17], [26]. Per le batterie Li-ion, infatti, il processo di trattamento stesso può trasformarsi in una fonte di impatto ambientale rilevante, data la complessità delle operazioni industriali richieste per il recupero dei materiali [18].

I benefici ambientali, quindi, dipendono da:

- Mix energetico utilizzato (elettricità rinnovabile vs fossile) [18];
- Efficienza di recupero dei metalli [19];
- Grado di chiusura dei cicli di reagenti (es. recupero e riutilizzo degli acidi di lisciviazione) [17];
- Gestione dei residui solidi e liquidi [20].

In particolare, i processi ad alta temperatura (pirometallurgia) presentano spesso un'impronta di carbonio elevata, dovuta al consumo diretto di combustibili fossili o all'elettricità per i forni [19], [20]. Parallelamente, i processi idrometallurgici rischiano di trasferire l'impatto ambientale sulle acque a causa della produzione di reflui [18].

Le valutazioni LCA più recenti confermano che le configurazioni impiantistiche capaci di integrare strategie di decarbonizzazione (es. utilizzo di energia rinnovabile, etc.) sono quelle che mostrano migliori performance nelle valutazioni LCA più recenti [18], [20].

3. Contesto italiano, capacità di trattamento e disponibilità dei flussi a fine vita

3.1 Implicazioni del Regolamento (UE) 2023/1542 per l'Italia

Sul territorio italiano, diversi report mostrano come il Regolamento UE ha fatto sì che nascesse la necessità di adeguare sia la rete di raccolta rifiuti per le apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) [25], sia la rete di raccolta dei veicoli a fine vita [27], ed inoltre adeguare (o meglio, migliorare) la capacità di trattamento della black mass [25].

Tali esigenze riguardano non solo l'adeguamento infrastrutturale e logistico [22], ma anche la capacità degli operatori di dimostrare prestazioni di recupero e di efficienza tramite dati tracciabili e bilanci di massa [23], in coerenza con gli obiettivi europei [26].

3.2 Industria delle batterie in Italia: stato, investimenti e capacità pianificata

L'analisi di Motus-E (l'associazione italiana costituita dai principali operatori industriali dei settori automotive ed energia e del mondo accademico per favorire la transizione energetica nel mondo dei trasporti, promuovendo la mobilità elettrica e divulgando i benefici economici e ambientali), nello specifico, il report *The implications for Italy of the new EU battery regulation* [25] analizza le implicazioni del Regolamento europeo per l'industria italiana delle batterie, ed evidenzia come sebbene caratterizzata da una vivace attività, l'industria opera in un contesto non ancora del tutto favorevole agli investimenti [20], in particolare per quanto riguarda i materiali precursori (i composti chimici intermedi, come gli idrossidi misti, indispensabili per la sintesi del catodo) [25] e la produzione di celle per il settore automotive [31].

Attualmente, la maggior parte dei progetti industriali relativi alla produzione di celle deve ancora avviarsi: sono pianificati 48 GWh di capacità in Gigafactory (mega-stabilimenti dedicati alla produzione massiva di celle e moduli batteria per il settore automotive) [25], valore ancora troppo basso, che colloca l'Italia al di sotto della media degli altri Paesi europei [25].

I produttori di *pacco batterie*⁸ sono diffusi, ma tendono ad avere dimensioni medio-piccole rispetto ai player globali [25]. Per questo motivo, i produttori tendono ad organizzarsi attraverso sistemi collettivi, come i consorzi, per adempiere agli obblighi imposti dalla normativa [22], quali ad esempio quelli derivanti dalla Responsabilità Estesa del Produttore (Extended Producer Responsibility, EPR) [25].

3.3 Filiera del riciclo in Italia: stato di sviluppo, competenze e progetti rilevanti

La filiera del riciclo delle batterie è ancora in una fase iniziale e coinvolge soggetti con precedenti esperienze in altre filiere di riciclo o nel riciclo delle batterie al piombo [17]. Tale situazione può essere interpretata come un'opportunità, poiché i nuovi impianti di riciclo necessari saranno realizzati adottando le migliori tecnologie disponibili [25]. È interessante osservare come molti operatori che in passato erano leader nel mercato delle batterie al piombo si stiano ora orientando verso il settore delle batterie al litio [25].

L'Italia ospita oggi centri di ricerca avanzati che contribuiscono all'innovazione nell'industria delle batterie [32]. La tradizione manifatturiera italiana svolge un ruolo significativo, dando origine a protagonisti di rilievo nello sviluppo di macchinari per la produzione di batterie [25] e nei sistemi di controllo elettronico e termico di tali dispositivi [25].

Parallelamente, sul fronte operativo, la filiera del riciclo è in piena fase di strutturazione: accanto ad una rete di operatori che gestiscono i rifiuti RAEE e rifiuti speciali (inclusi i flussi di piccole dimensioni) [17], si stanno sviluppando progetti orientati alle batterie per veicoli e agli scarti di produzione delle future Gigafactory [25].

Alcuni elementi emersi dalla letteratura e da documenti di progetto sono:

- **Progetto LIBAT e prototipi pilota**

Il processo cryo-mechano-idrometallurgico LIBAT, sviluppato in collaborazione tra università e partner industriali, è stato validato a scala pilota per il trattamento di batterie al litio primarie [32], dimostrando la possibilità di integrare pretrattamento

⁸ Il pacco batteria costituisce l'unità completa di accumulo energetico installata sul veicolo, risultante dall'assemblaggio di più moduli (a loro volta composti da celle) integrati con il sistema di gestione elettronica (BMS), il controllo termico e l'involucro di protezione meccanica. [25] [17]

criomeccanico e lisciviazione idrometallurgica con recupero di Mn e Li sotto forma di prodotti commerciabili [32].

- **Hub di Portovesme (Glencore-Li-Cycle)**

In Sardegna è previsto un grande hub di riciclo presso il sito metallurgico di Portovesme [33]. Secondo i comunicati ufficiali, l'impianto dovrebbe avere una capacità nell'ordine di 50.000-70.000 t/anno di black mass, equivalenti a circa 36 GWh di batterie, configurandosi come uno dei principali hub europei per la raffinazione di materiali da batterie [33].

- **Integrazione con la produzione di celle**

I progetti di Gigafactory europei che coinvolgono l'Italia prevedono sempre più spesso linee di gestione degli scarti di produzione, con possibilità di invio della black mass a hub interni o esterni [25]. Questo rafforza l'idea di una filiera chiusa, in cui produzione e riciclo sono strettamente integrati, riducendo costi logistici [18] e incrementando il controllo sui flussi di materia. [25].

Nel complesso, i dati suggeriscono che l'Italia, pur partendo da una situazione di svantaggio rispetto ad altri Paesi europei, dispone comunque di competenze scientifiche valide e di siti industriali idonei ad ospitare grandi hub di trattamento [25]. L'evoluzione normativa ed economica che si svilupperà nei prossimi anni determinerà il grado di integrazione tra queste iniziative [17] e la capacità effettiva del Paese di chiudere il ciclo dei materiali per le batterie [25].

3.4 Impianti di riciclo e capacità installate: focus su Europa e Italia

A livello europeo, a seguito (ed in parte grazie) al Regolamento (UE) 2023/1542 la capacità di riciclo delle batterie Li-ion è in rapida espansione [22]. Le recenti rassegne della letteratura scientifica e le analisi dello stato dell'arte stimano che, entro il 2025, la capacità di pretrattamento (spoke) possa raggiungere alcune centinaia di migliaia di tonnellate/anno [31]. Tali studi proiettano inoltre scenari di crescita che prevedono una capacità di raffinazione (hub) nell'ordine del milione di tonnellate/anno verso l'orizzonte 2030 [20].

Il modello spoke–hub è sempre più diffuso:

- Gli spoke sono impianti di pretrattamento meccanico, localizzati vicino ai flussi di rifiuti o ai siti produttivi, dove le batterie vengono messe in sicurezza, smontate [17] e trasformate in black mass [33];
- Gli hub sono grandi impianti centralizzati di trattamento metallurgico (piro/idro/ibrido) e raffinazione [17], dove la black mass viene trasformata in prodotti di valore (sali di metalli, leghe, materiali catodici rigenerati) [33].

In Figura 3 la rappresentazione grafica della differenza tra spoke e hub.

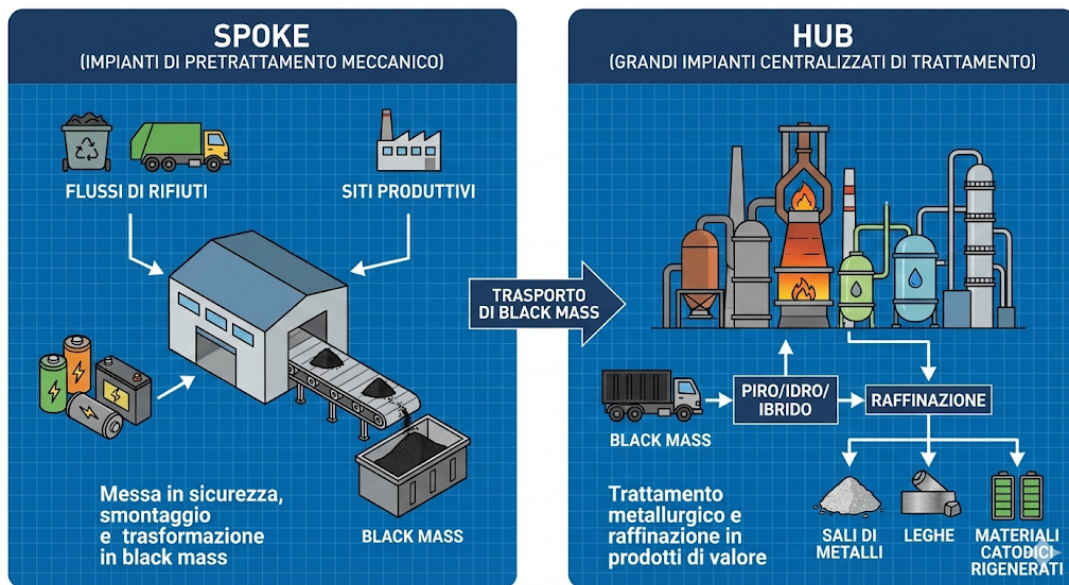


Figura 3: Differenza tra impianti spoke e hub

Nel medio periodo, alcuni scenari ipotizzano persino una sovraccapacità di riciclo rispetto ai volumi disponibili di batterie a fine vita, almeno in alcune regioni europee [31], con conseguenze sui margini economici degli operatori e sulla competizione per l'approvvigionamento della black mass [20].

3.5 Flussi di batterie esauste in Italia: dati CDCNPA e scalabilità

Per inquadrare il tema del riciclo nel contesto nazionale è utile considerare i dati ufficiali sulla raccolta dei rifiuti di pile e accumulatori. L'ente che si occupa della raccolta di pile e batterie in Italia è il Centro di Coordinamento Nazionale Pile e Accumulatori (CDCNPA), istituito dal D.Lgs. 188/2008 in recepimento della Direttiva 2006/66/CE [34], il quale coordina i sistemi collettivi e individuali dei produttori e pubblica ogni anno un rapporto di attività con i dati sulla raccolta e sulla gestione dei rifiuti di pile (RPA) [43].

I dati dei report CDCNPA sono organizzati per tipologia di rifiuto (pile e accumulatori portatili; accumulatori industriali; accumulatori per veicoli) [43], area geografica (ripartizione per Regione e, in alcuni casi, macroarea) e flussi di raccolta (raccolta coordinata dai sistemi iscritti e raccolta cosiddetta “volontaria”, effettuata da soggetti non iscritti ma rendicontata) [43].

Nel lavoro di tesi, tali informazioni sono rielaborate a partire dai report annuali CDCNPA (e dai relativi dati in formato tabellare) [40], costruendo un quadro quantitativo dei volumi raccolti su base nazionale e regionale [41].

Per trasparenza, nel capitolo metodologico vengono specificate le ipotesi utilizzate per distinguere, all’interno dei flussi totali, la quota attribuibile alle batterie agli ioni di litio [43], che non è sempre riportata separatamente nei documenti originali.

3.5.1 Ordine di grandezza dei flussi nazionali (portatili, industriali e veicoli)

I rapporti più recenti mostrano che, in Italia, i volumi di pile e accumulatori portatili raccolti si collocano nell’ordine di 10 kt/anno, con lievi oscillazioni tra un anno e l’altro. L’analisi temporale evidenzia i seguenti trend:

- Nel 2022 la raccolta di pile e accumulatori portatili si è attestata intorno a 10,29 milioni di kg, con un incremento di circa 40.000 kg rispetto al 2021 [36]. La raccolta degli accumulatori industriali e per veicoli ha invece raggiunto nel 2022 una quota di 125.835 tonnellate, in calo di circa 30.000 tonnellate rispetto al 2021 [38]. Maggiore è stato l’incremento degli accumulatori nuovi immessi sul mercato, pari a 397.350 tonnellate, un aumento dovuto anche alla sempre maggiore diffusione dei veicoli a trazione elettrica o ibrida e delle batterie destinate all’accumulo [36];
- Nel 2023 il volume raccolto è stato di circa 9,40 milioni di kg [40], con un leggero calo in peso ma un tasso di raccolta in aumento, grazie alla diminuzione dei quantitativi immessi sul mercato [40];
- Dati più aggiornati indicano che nel 2024 la raccolta di batterie portatili è tornata a superare i 10 milioni di kg [41], con un incremento di circa il 10% rispetto all’anno precedente [42].

Questi valori, pur riferendosi alla sola categoria di batterie portatili, forniscono un ordine di grandezza significativo del flusso potenziale di materiale che, nel medio periodo, giunge alle

fasi di trattamento e riciclo. Per quanto riguarda gli accumulatori industriali e per veicoli, le quantità raccolte sono comparabili o superiori, ma distribuite su filiere e codici rifiuto diversi, con una maggiore eterogeneità di tecnologie (piombo-acido, Ni-Cd, Li-ion, ecc.) [41].

3.5.2 Integrazione dei dati CDCNPA nella tesi

Nell'ambito di questa tesi, i dati CDCNPA sono utilizzati:

- Per stimare, su base nazionale, la massa annua di batterie potenzialmente disponibili per il riciclo [40] [41];
- Per derivare, tramite calcoli e assunzioni (es. rapporto tra massa di batteria e black mass), un ordine di grandezza della black mass generabile dai flussi attuali e futuri [17] [32].

Tali stime saranno riprese nel capitolo dedicato, su scala regionale, adottando criteri di ripartizione derivati da indicatori demografici e dalla domanda, a partire dai flussi riportati nei vari rapporti annuali del CDCNPA [43]. In questo modo, i dati costituiscono un ponte tra lo stato dell'arte (normativa, tecnologie, capacità impiantistiche) [20] e la valutazione di fattibilità del processo analizzato, consentendo di passare da considerazioni qualitative a stime di ordine di grandezza sulla scala di applicazione [43].

4. Impostazione metodologica

4.1 Ruolo del capitolo e inquadramento generale

Il presente capitolo definisce l'impostazione metodologica con cui la tesi analizza la filiera delle batterie Li-ion a fine vita, con particolare attenzione al recupero di metalli critici [44] e alla quantificazione del valore generato lungo la catena [45].

La metodologia è impostata per distinguere in modo esplicito tra il valore oggi generato lungo la filiera e il valore potenzialmente conseguibile attraverso interventi realistici. In particolare, l'analisi quantifica lo scarto tra scenario attuale e scenari di miglioramento costruiti su variazioni plausibili di resa dei processi, consumi energetici e di materiali, organizzazione logistica e configurazione territoriale della rete.

La necessità di adottare un approccio di filiera, deriva dalla caratteristica strutturale di sistema, infatti, il valore recuperabile delle batterie Li-Ion non dipende esclusivamente da una sola tecnologia "protagonista", come ad esempio la pirometallurgia o l'idrometallurgia per estrazione dei metalli critici, ma bensì dipende dall'interazione di molteplici fasi e attori [45]; ad esempio un pretrattamento fatto con una certa tecnica, potrebbe risultare in più o meno metalli estratti; oppure la qualità degli input (eterogeneità delle chimiche, presenza di impurità e componenti non metallici) influenza rese e consumi; allo stesso tempo la dispersione territoriale dei flussi e le distanze logistiche possono incidere sui costi [47].

Per questo motivo il sistema viene rappresentato come una rete di fasi e attori, descritta tramite scambi e trasformazioni lungo la catena [45]. Su questa struttura vengono definiti il caso attuale e gli scenari alternativi, in modo da rendere il confronto coerente e direttamente comparabile [47].

In coerenza con tale impostazione, la simbiosi industriale è considerata come variabile di scenario rispetto al caso base [46]. Operativamente, viene modellata come un diverso assetto di rete tra gli attori della filiera, in cui alcune relazioni vengono riorganizzate o integrate (ad esempio a livello di scambi di risorse/servizi e coordinamento logistico) [47] e se ne valuta l'effetto sul valore complessivo generato. Il confronto avviene mantenendo invariati la struttura di modellazione e i criteri di valutazione adottati nel capitolo.

L'obiettivo complessivo della tesi è la valutazione e il confronto delle performance tecnico-economiche della filiera, quantificando il valore generato [45] e identificando ciò che ne potrebbe incrementare il potenziale [46].

In particolare, la tesi sviluppa tre livelli di analisi:

1. La quantificazione del valore economico generato dalla filiera in condizioni attuali o realistiche nel breve periodo [45];
2. La stima del margine di miglioramento ottenibile intervenendo su rese, consumi specifici, qualità dei flussi e scelte organizzative [46];
3. La valutazione del ruolo di configurazioni alternative, incluse integrazioni intersettoriali e simbiosi industriale, rispetto al valore raggiungibile [47].

4.2 Definizioni operative: “valore raggiunto” e “valore raggiungibile”

Il concetto di valore viene trattato in maniera operativa per evitare ambiguità. Si considera valore raggiunto, il valore generato dalla filiera nel periodo corrente o in uno scenario del futuro prossimo: rese e costi sono compatibili con vincoli reali quali input eterogenei, efficienze non ottimali, logistica non minimizzata [45], limiti di scala, costi energetici e di servizio lontani da condizioni ideali [46].

Il valore raggiungibile è un valore potenziale che può essere raggiunto con dei cambiamenti attendibili, ma non automatici. Un esempio, come accennato nel capitolo precedente, potrebbe essere il miglioramento dei pretrattamenti, della qualità dell'input [45], aumento delle rese complessive di recupero, riduzione dei consumi specifici di energia e reagenti [46], maggiore integrazione tra fasi e ottimizzazione della logistica. In questa categoria rientrano anche eventuali scenari di integrazione inter-filiera (simbiosi industriale), considerati come varianti della filiera che possono agire sui costi di input, di gestione [47].

Il valore, come già anticipato, è inteso in termini tecnico-economici, come equilibrio tra costi e ricavi del riciclo [45]; tuttavia, la valutazione considera anche le condizioni di valorizzazione a valle, poiché la qualità degli output (purezza, stabilità e compatibilità con i mercati a valle) determina la valorizzazione effettiva e incide in modo non trascurabile sull'esito economico complessivo [46].

4.3 Necessità di un approccio “di rete”: dalla filiera lineare alla filiera come sistema

Spesso il riciclo è trattato come una sequenza lineare: raccolta, trattamenti, recupero di metalli. Quando però l'obiettivo è quello di stimare il valore di tutti i processi che fanno parte della filiera, allora conviene rappresentare i vari processi di riciclo come un sistema, una rete [45], questo perché esistono:

1. Interdipendenze tra le fasi di filiera

Un miglioramento “a monte” (es. migliore selezione o pretrattamento) può aumentare la resa “a valle”, ma potrebbe anche aumentare i costi lungo il processo [45]. È necessario quindi osservare l'effetto complessivo sulla filiera, non solo sul singolo impianto [47].

2. Fattori non riconducibili alla sola tecnologia

Non è solo una questione di chimica o macchinari: contano anche la continuità dell'input, la localizzazione degli impianti, le distanze di trasporto [45], i servizi necessari (trattamento delle acque, smaltimenti), ecc. Questi elementi possono cambiare molto il valore netto finale [47].

L'approccio giusto è modellare la filiera come insieme di “blocchi” collegati da flussi, e calcolarne il risultato totale.

Per catturare questi elementi in modo coerente e confrontabile, la tesi adotta una formalizzazione basata su un modello input-output a livello d'impresa e di rete [45].

4.4 Metodo MEIO: fondamenti teorici e applicazione al caso di studio

Per meglio rappresentare la filiera come rete e supportare il confronto tra scenari, questa tesi utilizza il formalismo Multi-layer Enterprise Input-Output (MEIO) [45], in linea con approcci proposti in letteratura per progettare e valutare reti produttive sostenibili [47] e strategie circolari su più livelli [46].

L'idea di fondo è descrivere la filiera come un insieme di entità/risorse (impianti, operatori, fornitori, servizi) collegate da flussi di:

- Materiali (batterie, frazioni intermedie, metalli recuperati, residui) [45];

- Energia (elettricità, calore, combustibili) [45];
- Reagenti e consumabili (a seconda della tecnologia) [45];
- Servizi (logistica, trattamento reflui, smaltimenti, servizi ausiliari) [45].

In questo modo, il modello non riduce la filiera a un singolo impianto “medio”, ma preserva e mette in risalto le relazioni tra attori e fasi, rendendo espliciti i punti dove si generano costi e dove si crea (o si perde) valore.

4.5 Struttura del modello: nodi, flussi, parametri e indicatori

Nell'applicazione al recupero di metalli da batterie, il modello MEIO viene costruito definendo una rete composta da nodi funzionali. In forma generale, i nodi includono:

- Raccolta/aggregazione e logistica primaria [36] [69];
- Messa in sicurezza e pretrattamento (selezione, separazione, produzione di frazioni intermedie) [36] [69];
- Recupero dei metalli (processo principale e separazioni) [69];
- Eventuale raffinazione/qualificazione degli output [69];
- Gestione residui e servizi ambientali [36] [69];
- Fornitori di energia, reagenti e servizi esterni [36] [69].

Reti produttive, filiere non lineari ed anche filiere del recupero e riciclo non possono essere valutate in modo robusto, con un unico indicatore o su un unico livello di analisi; serve una struttura che tenga insieme i flussi che viaggiano tra i vari attori, che tenga insieme valutazioni sia di tipo economico che di tipo ambientale [46].

Nel caso di tesi, nella filiera del riciclo di batterie, multilivello sta ad intendere che il risultato non dipende solo dal processo centrale, ma da una catena di livelli interdipendenti, quali raccolta, pretrattamenti, recupero, raffinazione e gestione dei residui.

Ogni livello introduce flussi e vincoli che modificano l'equilibrio complessivo e che non sono correttamente rappresentabili se si osserva soltanto un punto della catena [46].

Multidimensionale significa che una valutazione deve collegare almeno tre aspetti:

1. Bilanci fisici di materiale (quanta materia entra, quanta materia esce) [45];

2. Bilanci di fabbisogni, consumi (quanta energia viene utilizzata per un'attività) [45];
3. Costi e ricavi [45];

Una MFA (Material Flow Analysis) pura è estremamente utile per descrivere flussi materiali, o flussi “più semplici, lineari” [45], ma da sola non riesce a catturare tutta la complessità di una filiera, l'impatto economico delle scelte, e a rappresentare con la stessa chiarezza il ruolo di servizi e input di supporto (energia, reagenti, trattamento reflui) nella generazione o erosione del valore [46].

La metodologia MEIO fornisce, tramite una rappresentazione tabellare, una struttura chiara di input-output che rende diretto il collegamento tra i flussi fisici e indicatori di valore [45], mantenendo però chiara la separazione per attori/fasi e permettendo confronti di scenario trasparenti [45].

Questa motivazione è particolarmente rilevante nel presente lavoro, perché lo scopo non è solo “mappare i flussi”, ma misurare come cambiamenti mirati (rese, consumi, qualità, logistica) si traducono in differenze di valore raggiunto e raggiungibile.

4.6 Costruzione degli scenari: dal valore raggiunto al valore raggiungibile

La distinzione tra valore raggiunto/raggiungibile viene implementata tramite scenari.

Lo **Scenario 0 (baseline)** rappresenta il valore raggiunto: parametri, rese medie, input non omogeneo, consumi e costi coerenti con vincoli industriali e territoriali [45]. In sostanza, quello che accade oggi, il valore raggiunto dalla filiera in questo momento [36].

Lo **Scenario 1 (miglioramento intra-filiera)** rappresenta un raggiungimento tecnico-organizzativo: miglioramenti interni come aumento delle rese, riduzione dei consumi specifici [46], qualità più stabile dell'input grazie a pretrattamenti più efficaci [69], e miglioramento della logistica [47]. Includiamo inoltre varianti che incorporano alcune integrazioni esterne, tra cui la simbiosi industriale in senso stretto [47].

4.7 Associazione al caso di studio AMELIE: ruolo e perimetro

Il presente lavoro di tesi prende come caso di studio il progetto AMELIE, che costituisce il riferimento principale per definire il perimetro dell'analisi e la struttura della filiera di recupero [44].

In questo senso, il progetto AMELIE non è trattato come un semplice esempio applicativo, ma come la cornice entro cui vengono individuate le fasi rilevanti, i metalli target, gli output attesi e i passaggi più critici su cui costruire il confronto tra scenari [54] [69].

Coerentemente con l'impostazione definita, il formalismo **MEIO** viene adottato come strumento metodologico per organizzare in modo ordinato e trasparente la complessità del sistema: consente di tradurre la filiera in una rete di nodi e flussi, di rendere esplicite le assunzioni, e di collegare in modo diretto la descrizione qualitativa del capitolo metodologico ai calcoli quantitativi sviluppati nel Capitolo 6 [45] [69].

5. Il caso studio AMELIE, partner e formalizzazione

Il progetto AMELIE (New approaches to recovery critical METals from spent Lithium-ions batteries) è un progetto tutto italiano dedicato allo sviluppo di tecnologie sostenibili per il riciclo di batterie Li-ion [44], e il recupero dei materiali critici che compongono le celle stesse, come: litio, nichel, cobalto, manganese, etc. [48], puntando alla valorizzazione di fonti sostenibili di carbonio per gli anodi in grafite [50].

Il progetto si colloca all'interno di un partenariato esteso, quello del MICS: Made in Italy Circolare e Sostenibile [54], finanziato dal MUR (Ministero dell'Università e della Ricerca) con fondi PNRR e con il contributo di co-finanziamenti privati dei partner del partenariato [44] [49].

Il progetto AMELIE è stato avviato a marzo 2023 e si è concluso a dicembre 2025, con coordinamento da parte dell'Università degli Studi di Brescia (UniBS) [44], e ha coinvolto un partenariato nazionale di università e un partner industriale [52], con competenze complementari lungo l'intera filiera del riciclo [49] [53].

Questa fitta rete copre l'intero spettro di competenze necessarie alla buona riuscita del progetto: chimica dei materiali, processi di riciclo, ingegneria di processo, digitalizzazione, sostenibilità e design/manifattura per il reimpiego dei materiali [44].

5.1 Scopo del progetto

Per favorire una transizione verso la neutralità climatica nei settori trasporti ed il settore dell'energia, è cruciale il loro accoppiamento: le batterie possono portare fino alla riduzione del 30% di CO₂ richieste in questi due settori [44].

Tuttavia, come già anticipato nel capitolo precedente, la fornitura di metalli è precaria a causa dei limiti di riserva globale e della distribuzione geografica [44]. Soprattutto per l'Italia, territorio privo di questo tipo di risorse, questa transizione rappresenta un vincolo, ma anche un'opportunità, la quale può essere colta utilizzando strategie sui materiali secondari. Questo è proprio quello che si è cercato di ottenere con il progetto AMELIE.

Oggi, molti processi di recupero da rifiuti di batterie sono complessi e ad alta intensità di risorse (energia e reagenti) che, se non adeguatamente gestite, potrebbero andare contro lo stesso principio del riciclo [48]. AMELIE nasce proprio per sviluppare delle rotte alternative, più sostenibili ed eventualmente anche più efficaci, che possano rispondere alla crescente domanda di materie prime per batterie, garantendo una seconda vita ai rifiuti [44] [50].

In via preliminare, si precisa che nel progetto AMELIE le batterie Li-Ion più di interesse sono le batterie LCO, e NMC, di cui abbiamo già disquisito in precedenza [69]. Dal punto di vista tecnologico, il progetto adotta un approccio che combina una serie di pretrattamenti meccanici, processi termo-chimici assistiti da microonde e percorsi idro-/solvom metallurgici di estrazione e separazione dei metalli, per l'ottimale riciclo delle celle [44] [69].

Un risultato chiave del progetto è stato lo sviluppo di una tecnologia brevettata a microonde per il trattamento di black mass, capace di accelerare le reazioni, ridurre i consumi energetici e limitare l'uso di reagenti commerciali [51]; il progetto cerca inoltre di implementare il *battery digital passport* (il passaporto digitale delle batterie è un registro elettronico che documenta l'intero ciclo di vita di una batteria, dalla provenienza delle materie prime fino al riciclo a fine vita) per la tracciabilità lungo la catena del valore [44].

Inoltre, l'impianto scientifico include anche una nuova tecnologia per il trattamento dei fumi esausti [69]; in totale, le “nuove tecnologie” sono quattro (tre per il recupero dei metalli, una per i fumi), tutte a basso TRL (Livello di Maturità Tecnologica - è un metodo per la valutazione del grado di maturità di una tecnologia), con tre già coperte da brevetti [44]. Grande attenzione è rivolta alla supply chain del recupero, alla selezione dei materiali, alla modellazione e ottimizzazione dei processi di (de)manifattura e alla valutazione di soluzioni antropocentriche nel contesto del recupero [44].

5.2 Obiettivi regolatori e impatti attesi

Gli obiettivi dichiarati del progetto sono:

- Recupero sostenibile di oltre il 90% di Litio e Cobalto (in realtà >95%, in linea con i nuovi traguardi regolatori [44]) [48] [49];
- Contributo agli obiettivi UE 2030 sui rifiuti di batterie [11].

Nel quadro degli obiettivi grande attenzione è dedicata allo sviluppo del passaporto digitale per batterie, che potrebbe stimolare un mercato nazionale dei rifiuti di batterie oggi spesso inviati all'estero [11] [49].

Coerentemente con la cornice del MICS, le attività del progetto si dispiegano lungo la catena del valore del riciclo:

- Selezione delle batterie a monte [44];
- Preparazione della black mass tramite pretrattamenti (meccanici e termici) per condizionare il materiale, decomprimere i leganti, favorire i passaggi successivi [69];
- Estrazione e separazione dei metalli critici tramite lisciviazione ed in generale percorsi idro-/solvometallurgici per massimizzare rese e purezze, con attenzione alla minimizzazione dei reagenti e al recupero/riuso dei solventi [44] [69];
- Gestione delle emissioni e dei sottoprodotti potenzialmente tossici, utilizzando tecnologie per il trattamento dei fumi e la riduzione degli impatti ambientali [69]. Inoltre, in parallelo si esplorano approcci piro-, idro-, bio-idro- e solvometallurgici (inclusi media eutettici) [44] e si valuta la conversione di biowaste (es. legno) in bio-carbone via pirolisi, in ottica di anodi a minore impronta fossile [50];
- Re-impiego dei materiali recuperati [54];
- Strumenti digitali, passaporto digitale della batteria, modellazione e ottimizzazione dei processi, analisi di sostenibilità ambientale/energetica/economica e valutazioni logistiche secondo il paradigma *Triple Bottom Line*⁹ (ambientale, economico, sociale) [44];
- Scenari e fattibilità. Definizione e valutazione di scenari multipli per la catena di recupero, con analisi di fattibilità tecnica, economica e sociale [44].

5.3 Contributo della tesi

Questa tesi, mira a contribuire a mappare i flussi del progetto tramite il metodo MEIO, e valutare la scalabilità di questi; si propone di integrare e sistematizzare tutti i flussi di materia

⁹ Il paradigma della Triple Bottom Line (TBL) propone un approccio alla sostenibilità basato sull'equilibrio tra tre dimensioni: economica (Profit), sociale (People) e ambientale (Planet). Nel contesto del recupero delle batterie, tale modello impone di valutare la fattibilità dello scale-up non solo in termini di redditività, ma anche di sicurezza per l'operatore (approccio antropocentrico) e di riduzione complessiva dell'impronta ecologica della filiera.

ed energia che attraversano le unità operative di AMELIE, dai pretrattamenti alla raffinazione, fino all'integrazione dei materiali recuperati. L'approccio sarà basato su MEIO [45], per:

- Definire i confini di sistema, (fasi a monte, processi primari, fasi a valle) e la granularità delle operazioni (microonde, lisciviazioni, filtrazioni, precipitazioni, trattamento fumi, asciugature) [45] [69];
- Quantificare input e output per ciascuna operazione: masse (black mass, reagenti, solventi, ausiliari, sottoprodotti), energia (elettrica/termico), emissioni (gassose, liquide, solide) e recuperi (metalli, grafite, solventi) [45] [69];
- Ricostruire bilanci di massa ed energia end-to-end, con tabelle di processo e schemi tra le unità, evidenziando accumuli e perdite [45] [69];
- Valutare le rese di recupero (Li, Co, Ni, Mn, grafite) e i consumi specifici (kWh/kg, L/kg, kg/kg), includendo incertezze e intervalli operativi [69];
- Analizzare colli di bottiglia e trade-off (energia vs reagenti; selettività vs resa; tempo di residenza vs throughput), con scenari di ottimizzazione [46];
- Derivare indicatori di fattibilità industriale, per quanto possibile: OPEX specifici, intensità energetica, produttività, recuperabilità/riuso solventi, gestione sottoprodotti, indicatori diretti per capex e requisiti ESG¹⁰ (passaporti digitali, tracciabilità, limiti emissivi) [45] [47];
- Confrontare lo stato della sperimentazione su scala di laboratorio o pilota con i possibili scenari di incremento dimensionale (TRL 6-8¹¹): parametri di scala (potenza microonde, geometrie, mixing, scambi termici), configurazione d'impianto e impatti logistici (volumi, stoccaggi, sicurezza) [45] [46].

Collegando esplicitamente la mappatura MEIO agli obiettivi regolatori 2030 ($\geq 95\%$ Li/Co) [11], la discussione finale confronterà gli scenari progettuali con vincoli reali di sostenibilità ambientale, economica e sociale, in linea con l'approccio *Triple Bottom Line* e con lo sviluppo del mercato nazionale dei rifiuti di batterie abilitato dall'e-passport [44].

¹⁰ L'acronimo sta per Environmental, Social, and Governance. Si tratta di un insieme di standard operativi che gli investitori e le normative europee (come la Corporate Sustainability Reporting Directive - CSRD) utilizzano per misurare l'impatto di un'azienda o di un progetto

¹¹ L'acronimo TRL sta per Technology Readiness Level (Livello di Maturità Tecnologica). È una scala che va da 1 a 9 e serve a capire quanto una tecnologia sia vicina alla commercializzazione

5.4 Formalizzazione del caso di studio con il metodo MEIO

Per rendere operativa la descrizione del caso di studio AMELIE, trasformare informazioni bibliografiche e sperimentali in una rappresentazione strutturata del processo, in questa tesi è stato adottato il metodo Multi-layer Enterprise Input-Output (MEIO) [45]. L'obiettivo del metodo non è assolutamente quello di ridisegnare il processo in modo astratto, ma formalizzare la conoscenza in una struttura che sia coerente, tracciabile e aggiornabile che permetta di passare da una narrazione qualitativa ad una base quantitativa ed utilizzabile per calcoli di scenario e confronti [46]. Nella formalizzazione del metodo MEIO, per tracciare i vari processi, vengono utilizzate tre tabelle [45]:

- Resource-Activity (RA) - di cui un esempio in Figura 4;
- Activity-Parameters (AP);
- Resource-Function (RF) - di cui un esempio in Figura 5.

Table A1. The initial Resource-Activity MEIO table for the plastic pipeline manufacturing.

Resource-Activity table	P1	T1	W1	P2	T2	W2	P3
Plastic mix (kg/hr)	500/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Humid waste (kg/hr)	-/56*	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Shredded, humid mix (kg/hr)	-/498	4500/4356	10000/9920	700/-	-/-	-/-	-/-
Plastic pellet (kg/hr)	-/-	-/-	-/-	-/681	-/-	-/10000	750/-
Under q. pellet (kg/hr)	-/-	-/-	-/-	-/59	-/-	-/-	-/-
Bags of pellet (bags)	-/-	-/-	-/-	-/66	533/533	971*/-	-/-
CO ₂ (g/delivery)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/33	-/-	-/-
Chemical additives (kg/hr)	-/-	-/-	-/-	40/-	-/-	-/-	50*/-
Fuel (ml/delivery)	-/-	-/-	-/-	-/-	66*/-	-/-	-/-
Power (kWh)	160/-	15*/-	-/-	175/-	-/-	-/-	168/-
Used power (kWh)	-/60	-/10	-/-	-/148.5*	-/-	-/-	-/111
Water (lt/hr)	500/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
Waste water (lt/hr)	-/446	-/144	-/80*	-/-	-/-	-/-	-/-
Dissipated heat (kWh)	-/100	-/5	-/-	-/26.5	-/-	-/-	-/57
Pipeline d200 (kg/hr)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/399.95
Pipeline d600 (kg/hr)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/397.95
Defective pipeline d200 (kg/hr)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/0.045
Defective pipeline d600 (kg/hr)	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/2.05

Figura 4: Esempio tabella RA (Fonte: [45])

Table 4. The Resource-Function MEIO table for the three-activity process.

Resource-Function table	P1	T1	W1
Plastic mix (kg/hr)	$Y = 8.929X; -$	$-;$	$-;$
Humid waste (kg/hr)	$-; X^*$	$-;$	$-;$
Shredded, humid mix (kg/hr)	$-; Y = 8.896X$	$Y = 300(X-0.1); Y = 290.4(X-0.1)$	$Y = 125X; Y = 124X$
Power (kWh)	$Y = 2.857X + 0.5; -$	$X^*; -$	$-;$
Used power (kWh)	$-; Y = 1.071X$	$-; Y = 0.667(X-0.1)$	$-;$
Water (lt/hr)	$Y = 8.929X; -$	$-;$	$-;$
Waste water (lt/hr)	$-; Y = 7.964X$	$-; Y = 9.6(X-0.1)$	$-; X^*$
Dissipated heat (kWh)	$-; Y = 1.786X + 0.5$	$-; Y = 0.333(X-0.1)$	$-;$

Figura 5: Esempio tabella RF (Fonte: [45])

La base dati iniziale è stata costruita a partire da dati sperimentali e indicazioni tecniche; successivamente è stata integrata con ulteriori riferimenti bibliografici [45] [47]. Questo

processo di consolidamento ha permesso di identificare in modo sistematico risorse chiave, input, output attesi e principali criticità di processo, fino a completare in maniera coerente le tabelle caratteristiche della formalizzazione MEIO, con l'esclusione della tabella Activity-Parameters (AP) [45]. Tale tabella richiede infatti un livello di dettaglio parametrico non sempre disponibile nelle fonti considerate e, coerentemente con l'impostazione adottata nel presente lavoro, non è stato possibile ricostruirne in modo completo e robusto tutti i valori necessari [46].

5.5 Tabella Resource-Activity (RA) e tabella Resource-Function (RF)

La tabella RA è la prima struttura compilata, perché rappresenta la fotografia “contabile” del sistema [45], per ciascuna attività (colonne), vengono riportate le risorse utilizzate (righe), che vengono assorbite e generate dalle attività [46]. Tra le risorse principali presenti nel caso di studio [69]:

- black mass;
- reagenti;
- acqua;
- etc.

In altre parole, la tabella RA esplicita i flussi che attraversano ciascuna fase del processo e ne indica gli input e output [45]. Questa tabella è anche la base per costruire successivamente schemi di flusso e rappresentazioni grafiche del sistema (ad es. il grafo RA), perché esplicita la struttura delle interdipendenze tra fasi e risorse [46].

Una volta definita la tabella RA, il passo successivo è la tabella RF, che descrive le relazioni funzionali tra input e output e un driver di processo (la risorsa chiave normalizzante) [45].

Nella tabella RF, le relazioni tra i flussi sono rappresentate come funzioni (semplici, lineari o a tratti) che, per ciascuna attività, esprimono input e output in funzione di una risorsa chiave scelta come variabile normalizzante, rendendo esplicite le dipendenze tra i flussi all'interno della singola fase [45] [46]. Questo rende possibile passare dai dati sperimentali (scala di laboratorio) a simulazioni di scenario e confronti coerenti, mantenendo esplicite le assunzioni di proporzionalità o di non-linearità quando necessario [45].

I dati sperimentali di partenza sono riferiti ad una scala di laboratorio (0.1 kg di black mass). Per rendere i dati più leggibili verrà applicato un fattore di scala per riportare i flussi ad una base rappresentativa, che sia in grado di rappresentare consumi e rese in maniera più chiara [45]. Operativamente, il moltiplicatore verrà applicato in maniera coerente alle grandezze che scalano linearmente con la quantità trattata, mentre eventuali consumi non proporzionali o vincoli di processo saranno trattati senza moltiplicatore, ma in modo tale da rimanere coerenti con la trattazione corrente [46].

5.6 Scenario di industrializzazione

Oltre alla formalizzazione sulla scala di laboratorio, è previsto un ulteriore step, quello della modellazione orientata all'industrializzazione del processo [45]. Qui la stessa logica MEIO sarà utilizzata per costruire una versione di tabella che include elementi tipici di esercizio industriale, come:

- Ricircolo o riuso dell'acqua (es. acqua di processo non scaricata, ma rinviata a lisciviazioni successive) [69];
- Ipotesi sulla portata in ingresso (numero di batterie/lotto o massa equivalente in alimentazione) [69];
- Stime di output recuperabili (metalli e frazioni di interesse) in unità coerenti e confrontabili [69].

Questo passaggio, quindi, utilizzerà i dati della sezione, precedente con assunzioni leggermente diverse, con l'obiettivo di rendere confrontabile la situazione 'as-is', con una configurazione quanto più vicina ad un impianto reale, evidenziando come la chiusura dei loop (come il riuso dell'acqua) e la gestione delle risorse, modifichino consumi e prestazioni [45] [46].

Nella costruzione dello scenario industriale, includiamo anche contributi di soluzioni e altre filiere esplorate in altri filoni di ricerca, come possibili leve di integrazione o sostituzione di risorse / ausiliari di processo [47]. L'inserimento di questi contributi avviene in modo coerente con la formalizzazione MEIO, così da mantenere tracciabile l'effetto sul bilancio complessivo [45] [11].

6. Descrizione dell'esperimento e ricostruzione della filiera di riciclo

Nel capitolo precedente è stata introdotta la logica di formalizzazione, in questo capitolo, andiamo ad utilizzare attivamente la formalizzazione MEIO [45], rendendo esplicito “cosa” viene modellato: quali fasi compongono la catena, quali sono i confini tra le varie attività [46]. In che modo le varianti sperimentali influenzano l’output [47].

Come anticipato, l’esperimento si inserisce in un contesto collaborativo, caratterizzato dalla presenza di molteplici gruppi di ricerca, i quali fanno parte di differenti atenei italiani [54], ciascuno focalizzato su specifiche tecnologie o porzioni della filiera [52]. Ne deriviamo quindi che l’esperimento non coincide con una singola “linea”, eseguita da un unico attore, ma è composta da una molteplicità di fasi [44], di cui, alcune sono fasi di sperimentazione diretta, mentre altre sono considerate come precondizioni operative, sulla base di assunzioni motivate e informazioni di contesto [48] [49] [50].

All’interno del progetto, le attività sperimentali fanno parte di filoni tecnologici differenti: trattamenti a microonde, idrometallurgia, solvometallurgia, pretrattamenti meccanici, etc. [44] La distribuzione dei contributi lungo la catena comporta una naturale eterogeneità dei processi indagati, che devono essere ricondotti a un quadro unitario [48] [49] [50].

A supporto della ricostruzione della filiera, viene pertanto introdotta una rappresentazione grafica delle attività e dei partner [44]. Inoltre, tramite la Figura 6, possiamo anche vedere quali

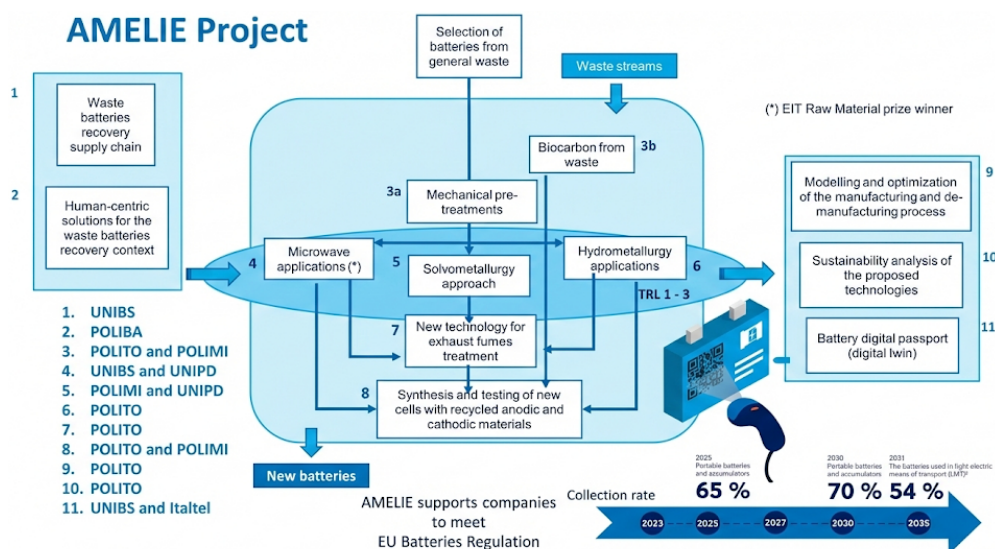


Figura 6: Rappresentazione grafica progetto AMELIE (Fonte:[69])

sono state le attività esternalizzate dal progetto, e quali invece sono state le attività svolte in laboratorio, rappresentate all'interno del riquadro azzurro [52]. Successivamente, vedremo come queste scelte hanno influenzato input e output del modello [69].

6.1 Perimetro dell'esperimento e assunzioni principali

Il perimetro dell'esperimento adottato dal progetto AMELIE considera batterie agli ioni di litio appartenenti alle chimiche LCO e NMC, e una classe mista (LCO/NMC), mentre, le batterie LFP non rientrano nel perimetro del caso studio [44] [69].

Dal punto di vista della catena di processo, è cruciale la distinzione tra le attività a monte della produzione di black mass, e le attività che sono state effettivamente oggetto di indagine sperimentale:

- Le fasi che precedono la produzione di black mass verranno incluse nella descrizione della filiera in quanto necessarie per una rappresentazione completa del progetto, ma non sono replicate in laboratorio [44];
- La produzione della black mass non viene realizzata internamente: per lo svolgimento degli esperimenti la black mass è stata acquistata come materiale di input [69]. L'intero blocco di pretrattamento e produzione della black mass è quindi esternalizzato [44] [69];
- Le fasi sperimentate direttamente dai gruppi di ricerca comprendono il trattamento assistito da microonde e la lisciviazione (in condizioni differenti), cui segue il recupero/estrazione dei metalli [44] [51].

Tale impostazione consente di concentrare l'analisi sulle fasi di trattamento oggetto di sperimentazione e sulle loro prestazioni, mantenendo al contempo un legame con la filiera completa tramite assunzioni esplicite e verificabili [45] [46] [47].

6.2 Sequenza generale dei passaggi considerati

Ai fini della formalizzazione e della successiva analisi, l'esperimento viene descritto attraverso una sequenza generale di riferimento, riconducibile a una catena industriale di riciclo delle batterie a fine vita [44]. La filiera viene articolata nei seguenti passaggi:

- Raccolta delle batterie a fine vita, intesa come conferimento e convogliamento verso impianti autorizzati o piattaforme di trattamento [34] [69];

- Scarica in sicurezza (discharge), necessaria per ridurre il rischio elettrico e termico nelle fasi successive [5] [69];
- Smantellamento e disassemblaggio, con separazione preliminare dei componenti [17] [69];
- Riduzione dimensionale e triturazione, tramite tecnologie quali impact crushers, knife milling e ball milling [19] [69];
- Produzione di black mass, come output della catena di pretrattamento (fase esternalizzata nel presente lavoro) [67] [69];
- Trattamento assistito da microonde, svolto dai gruppi di ricerca nell'ambito dell'attività sperimentale [51] [69];
- Lisciviazione, condotta in due condizioni principali:
 - Lisciviazione in acqua [69];
 - Lisciviazione in acido malico [69];
- Recupero/estrazione dei metalli, come conseguenza delle lisciviazioni e delle condizioni operative adottate [44] [51] [69].

Questa rappresentazione consente di rendere immediatamente identificabili sia la collocazione delle fasi sperimentate, sia le dipendenze tra i blocchi, evitando che l'analisi si riduca a una collezione di risultati non comparabili [45] [46] [47].

6.3 Variabilità dell'input: black mass differenti e implicazioni sui risultati

Un elemento determinante dell'esperimento è legato alla natura dell'input primario, la black mass. In particolare, i processi di pretrattamento di questa, fanno sì che le successive lavorazioni possano portare a risultati differenti.

Nell'esperimento abbiamo preso in considerazione due black mass differenti: la BM1 (black mass 1) è una black mass sottoposta a pretrattamenti termici da parte del fornitore, mentre la BM2 (black mass 2) non ha subito pretrattamenti termici [44] [69].

Il pretrattamento termico vediamo essere utile per minimizzare la perdita di materiale nel successivo trattamento a microonde del processo [51]. Tale differenza, pur collocandosi nelle

prime fasi dell'esperimento, influenza in modo diretto e misurabile le prestazioni delle fasi successive [51] [69].

Per questa ragione, in questa tesi, nella tabella MEIO Resource - Activity andiamo a mostrare il comportamento di due black mass differenti.

A valle, andiamo quindi a mantenere questa distinzione nella formalizzazione del processo mediante l'introduzione di due "rami" dello stesso processo. [45] [46] [47]

Prima di partire con la descrizione dell'intero processo, nella Figura 7 osserviamo i materiali che compongono due black mass differenti (in questo caso entrambe sottoposte a pretrattamenti termici), questa tabella, ci aiuta a comprendere la composizione di una black mass generica e ci aiuta a sviluppare la tabella RA MEIO. [44]

Element	Co	Ni	Mn	Li	Cu	Al	Fe	C	Others
wt.%, Dry Basis									
BM1	17.5	5.1	3.0	3.9	3.9	1.6	1.6	36.0	27.4
BM2	5.4	12.5	10.9	2.6	3.1	4.8	2.3	42.1	16.3

Figura 7: Analisi chimica di due black mass soggette a pretrattamenti (Fonte: [67])

6.4 Fasi sperimentali

Come visto in precedenza, non tutte le fasi del progetto sono state sviluppate in laboratorio. Procederemo quindi in parte per assunzioni. Il processo si compone di 10 attività, come elencato nel sottocapitolo 5.2 [69]:

- Scarica
- Disassemblaggio
- Rimozione Organici
- Triturazione
- Microonde
- Lisciviazione in acqua
- Filtraggio vacuum
- Lisciviazione in acido malico
- Filtraggio
- Evaporazione con Rotavapor

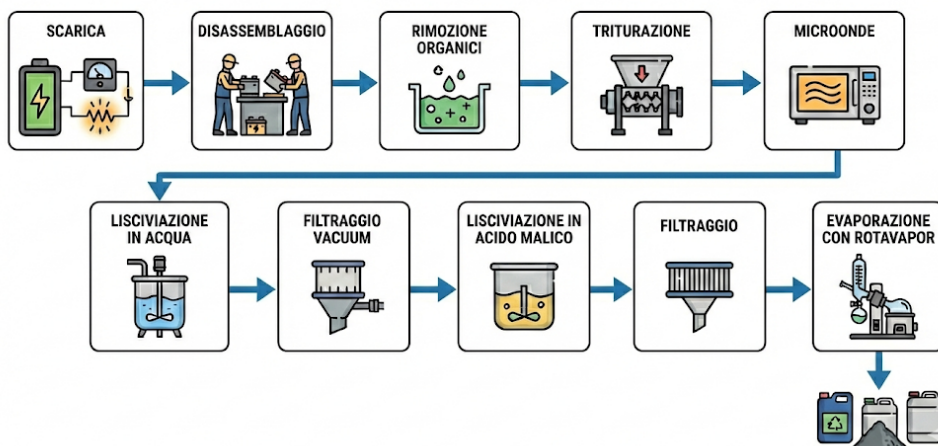


Figura 8: Rappresentazione grafica del processo di riciclo nel progetto AMELIE

Nella Tabella 2 osserviamo il processo trattato con formalizzazione MEIO [45]. Per tutte le attività precedenti al trattamento a microonde, abbiamo proceduto per assunzioni, che mostreremo nei capitoli successivi [46] [47].

La tabella, riporta tutti i processi di laboratorio. In questo capitolo, mostriamo i dati esattamente in scala, per come sono stati realmente lavorati [69].

Partiamo con delle black mass (BM) di 100 g (0,100 kg), la BM1, è sottoposta ad un pretrattamento termico: una fase preliminare in grado di modificare lo stato del materiale e, conseguentemente, la sua reattività e accessibilità nella lisciviazione; mentre la BM2, non ha subito ulteriori lavorazioni [69].

Attività	Scarica		Disassemblaggio		Rimozione Organici		Triturazione		Trattamento a Microonde		Lisciviazione in acqua		Filtraggio vacuum		Lisciviazione in acido malico		Filtraggio		Evaporazione con Rotavapor		
	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	
Risorse																					
Black Mass 1 - MW (Kg)									0,10000			0,09000									
Black mass 2 (Kg)									0,10000			0,06500									
Perdite BM1 (Kg)											0,01000										
Perdite BM2 (Kg)											0,03500										
Acqua BM1 (Kg)												2,25000									
Acqua BM2 (Kg)												1,62500									
Estratto (Soluzione con Litio) (Kg) BM1													2,25155	2,25155							
Estratto (Soluzione con Litio) (Kg) BM2													1,62612	1,62612							
Residuo solido (ricco di cobalto, tracce di litio, manganese e nichel) (Kg) BM1													0,08845	0,08845	0,07511	0,07511					
Residuo solido (ricco di cobalto, tracce di litio, manganese e nichel) (Kg) BM2													0,06388	0,06388	0,05425	0,05425					
Residuo scartato (Kg) BM1															0,01334						
Residuo scartato (Kg) BM2															0,00963						
Acqua di scarto (Solvente con tracce di Litio) BM1															2,24617		2,24617				
Acqua di scarto (Solvente con tracce di Litio) BM2															1,62223		1,62223				
Polvere Litio (Kg) BM1															0,00140						
Polvere Litio (Kg) BM2															0,00101						
Acqua evaporata (Kg) BM1															0,00398						
Acqua evaporata (Kg) BM2															0,00287						
Li/Al-LDHs (idrossidi doppi stratificati) BM1																	0,00146				
Li/Al-LDHs (idrossidi doppi stratificati) BM2																	0,00105				
Leachate 3 BM1																		2,24471	2,24471		
Leachate 3 BM2																		1,62118	1,62118		
CaCO3 BM1																					0,01190
CaCO3 BM2																					0,00859
H2O BM1																					2,23281
H2O BM2																					1,61258
Acqua (Kg) (98.5% della soluzione) BM1																	1,84968				0,00000
Acqua (Kg) (98.5% della soluzione) BM2																	1,33588				
Perossido di idrogeno (kg) (1.5% della soluzione) BM1																	0,03127				
Perossido di idrogeno (kg) (1.5% della soluzione) BM2																	0,02258				
Acido malico (1.2 M) (kg) BM1																	0,29763				
Acido malico (1.2 M) (kg) BM2																	0,21495				
Acqua di scarto da lisciviazione con malico (kg) BM1																					
Acqua di scarto da lisciviazione con malico (kg) BM2																					
Estratto (Soluzione con Litio, Nichel, Cobalto, Manganese) (Kg) BM1																		2,19888			
Estratto (Soluzione con Litio, Nichel, Cobalto, Manganese) (Kg) BM2																		1,58808			
Residuo solido BM1																		0,05481			
Residuo solido BM2																		0,03959			

Tabella 2: Resource Activity MEIO, dati laboratorio (Fonte: [69])

La prima attività alla quale deve essere sottoposta la BM è il trattamento a microonde: trattamento termico mediante riscaldamento a microonde in un forno da laboratorio (potenza max 1800 W; temperatura max 1200 °C) [51] [69]. Il trattamento è stato eseguito in una camera in allumina (\varnothing esterno 220 mm, h 170 mm) dotata di sede per suscettore e portacampione (\varnothing 148 mm, h 80 mm) [69]. Per favorire l'assorbimento dell'energia elettromagnetica e la conversione in calore, è stato impiegato un suscettore in carburo di silicio (SiC) costituito da un anello (\varnothing esterno 130 mm; \varnothing interno 124 mm; h 40 mm) e da un fondo cilindrico (\varnothing 90 mm; h 5 mm) [51]. Il campione è stato alloggiato in un portacampione (\varnothing 40 mm; h 35 mm) in grafite e/o fibra di quarzo. Il trattamento è stato condotto a potenza compresa tra 400 e 1000 W per un tempo di 5-15 minuti [69].

Per la BM1, a seguito di questo trattamento, si riscontra una perdita di massa del 10%, mentre per la BM2, una perdita di massa tra il 30% e il 40% [69].

Successivamente al trattamento a microonde, sono state eseguite prove di lisciviazione della black mass in due condizioni, in acqua e in soluzione di acido malico, mantenendo in entrambi i casi un rapporto solido/liquido pari a 40 g/L [69]. Nel caso della lisciviazione in acido malico, è stata impiegata una soluzione acquosa di acido malico a concentrazione 1,2 M, con aggiunta di perossido di idrogeno (H_2O_2) in quantità pari all'1,5% rispetto al volume totale della soluzione; la sospensione è stata riscaldata su piastra fino a 80°C e mantenuta a tale temperatura per 30 minuti [51] [69]. Al termine di ciascuna prova la sospensione è stata sottoposta a filtrazione a pressione ridotta mediante pompa a vuoto per separare la fase liquida dal residuo solido; come riferimento operativo, per 1 g di campione il tempo di filtrazione è stato dell'ordine di circa 1 minuto [69]. Il solido trattenuto è stato infine recuperato e asciugato in forno a 105°C per circa 10 minuti (per 1 g di campione), al fine di rimuovere l'umidità residua [51].

Il recupero dei metalli viene quindi trattato come l'esito delle lisciviazioni e dei successivi filtraggi. [51]

6.5 Estensione del perimetro e ricostruzione end-to-end della filiera: fasi a monte della black mass

Nelle sezioni precedenti abbiamo descritto le attività svolte in laboratorio, che costituiscono il nucleo sperimentale dell'esperimento e la base empirica della parametrizzazione del modello. Tuttavia, per interpretare i risultati ottenuti e collocarli in una filiera industriale coerente, è

necessario adottare una prospettiva end-to-end, ampliando quindi il perimetro del progetto oltre i confini strettamente sperimentali [45].

Introduciamo in questa sezione (i) le fasi a monte della filiera raccolta delle batterie, produzione di black mass (ii) le fasi a valle, successive al recupero dei metalli, potenziale re-immissione di questi nella catena del valore e in prospettiva la produzione di nuove celle [11] [46].

Dato che queste fasi non sono state oggetto di sperimentazione in laboratorio, sono trattate come blocchi esterni [47]. Per i dati a monte della filiera, cioè la raccolta di batterie esauste, si utilizzano i dati sulla raccolta regionale del CDCNPA (Centro di Coordinamento Nazionale Pile e Accumulatori), report del 2024 [41]. Per i dati a valle della filiera si adottano assunzioni della letteratura per descrivere il passaggio dai metalli recuperati, a precursori/materiali attivi e alla possibile chiusura del ciclo. In questo modo si mantiene chiara la distinzione tra dati sperimentali e componenti assunte [11] [45] [46] [47].

Nel rapporto annuale, le batterie sono inquadrare in due macrocategorie: pile e accumulatori portatili e accumulatori industriali e per veicoli; per le pile portatili è esplicitata la distinzione tra pile non ricaricabili e accumulatori ricaricabili, tra cui sono citati nichel-cadmio, nichel-idruro metallico e “ioni di litio” (categoria dentro cui ricadono le celle con catodi NMC e LCO) [41].

Per le batterie industriali e per veicoli, il rapporto evidenzia che la tecnologia più diffusa è piombo-acido, ma che stanno diventando sempre più comuni anche gli accumulatori agli ioni di litio (oltre al nichel-cadmio) [41]. Infine, viene richiamato l’impatto del Regolamento (UE) 2023/1542, che ridefinisce le categorie (incluse quelle per mobilità elettrica) e introduce obiettivi e requisiti più stringenti lungo tutto il ciclo di vita delle batterie [11]. In termini impiantistici, il rapporto segnala che per tecnologie diverse dal piombo i processi di trattamento/recupero risultano più complessi e finora spesso svolti all’estero, ma che sono previsti nuovi impianti dedicati in particolare alle tecnologie del litio [41].

Nella Tabella 3 sono riportati i dati estratti dal Rapporto Annuale CDCNPA 2024 relativi alla raccolta di pile e accumulatori a livello regionale [41]. In particolare, per ciascuna regione confrontiamo i kg di pile raccolti tramite il sistema CDCNPA, con quelli raccolti da altri canali, includendo anche una normalizzazione rispetto alla popolazione italiana, in modo tale da rendere confrontabili territori con dimensioni demografiche diverse [11] [41].

Regione	Raccolto 2024 CDCNPA	Popolazione Italia 2024	% Raccolto CDCNA (reg.) / Raccolto CDCNPA Tot.	Peso Popolazione reg./tot pop. Italia	Raccolto Italia Distribuzione Ideale	Raccolto CDCNPA Distribuito Idealmente	%Δ Raccolto reale(c) / raccolto ideale	Raccolto Operatori I= CDCNPA	Kg raccolti per abitante	Consumo/abitante	numero batterie/abitanti/anno
Abruzzo	79881,00	1269571,00	0,01	0,02	223551,91	115237,76	-30,68%	35356,76	0,06	0,17	6,88
Basilicata	45479,00	533233,00	0,01	0,01	93894,12	48401,06	-6,04%	2922,06	0,09	0,23	9,32
Calabria	29335,00	1838568,00	0,01	0,03	323743,53	166885,09	-82,42%	137550,09	0,02	0,04	1,74
Campania	147148,00	5593906,00	0,03	0,09	985000,75	507753,58	-71,02%	360605,58	0,03	0,07	2,87
Emilia-Romagna	593076,00	4451938,00	0,11	0,08	783917,76	404098,22	46,77%	-188977,78	0,13	0,36	14,56
Friuli-Venezia Giulia	184581,00	1194616,00	0,03	0,02	210353,49	108434,17	70,22%	-76146,83	0,15	0,42	16,89
Lazio	328305,00	5714745,00	0,06	0,10	1006278,64	518722,02	-36,71%	190417,02	0,06	0,16	6,28
Liguria	116920,00	1509140,00	0,02	0,03	265736,33	136983,22	-14,65%	20063,22	0,08	0,21	8,47
Lombardia	1374246,00	10012054,00	0,26	0,17	1762968,62	908784,71	51,22%	-465461,29	0,14	0,38	15,00
Marche	147344,00	1482746,00	0,03	0,03	261088,75	134587,46	9,48%	-12756,54	0,10	0,27	10,86
Molise	6120,00	289224,00	0,00	0,00	50927,90	26252,59	-76,69%	20132,59	0,02	0,06	2,31
Piemonte	449517,00	4251623,00	0,08	0,07	748645,38	385915,81	16,48%	-63601,19	0,11	0,29	11,56
Puglia	124494,00	3890661,00	0,02	0,07	685085,52	353151,63	-64,75%	228657,63	0,03	0,09	3,50
Sardegna	100396,00	1570453,00	0,02	0,03	276532,60	142548,54	-29,57%	42152,54	0,06	0,17	6,99
Sicilia	74552,00	4797359,00	0,01	0,08	844741,09	435451,76	-82,88%	360899,76	0,02	0,04	1,70
Toscana	374863,00	3660530,00	0,07	0,06	644563,00	332262,86	12,82%	-42600,14	0,10	0,28	11,19
Trentino-Alto Adige	247779,00	1082702,00	0,05	0,02	190647,16	98275,84	152,13%	-149503,16	0,23	0,63	25,01
Umbria	77008,00	853068,00	0,01	0,01	150212,15	77432,18	-0,55%	424,18	0,09	0,25	9,87
Valle d'Aosta	19099,00	122877,00	0,00	0,00	21636,75	11153,43	71,24%	-7945,57	0,16	0,42	16,99
Veneto	832620,00	4852216,00	0,16	0,08	854400,56	440431,08	89,05%	-392188,92	0,17	0,47	18,75
Tot.	5352763,00	58971230,00	100%	100%	10383926,00	5352763,00					

Tabella 3: Volumi di batterie a litio raccolti in Italia, anno 2024 (Fonte: CDCNPA)

Regione	Totale numero di impianti / punti autorizzati alla raccolta o al recupero	Centri comunali	Distribuzione	Assistenza tecnica	Stoccaggio	Impianti RAEE	Grandi utilizzatori	% Impianti regione/Tot. Impianti
Abruzzo	382	49	314	6	6	5	2	2,63%
Basilicata	137	58	74	2	1	2	0	0,94%
Calabria	390	43	326	9	9	2	1	2,68%
Campania	1164	192	922	18	20	7	5	8,01%
Emilia-Romagna	856	257	533	39	12	12	3	5,89%
Friuli-Venezia Giulia	378	106	255	8	6	1	2	2,60%
Lazio	1510	147	1297	30	13	6	17	10,39%
Liguria	383	84	278	10	7	1	3	2,63%
Lombardia	2760	614	2016	56	36	24	14	18,99%
Marche	398	82	285	6	16	8	1	2,74%
Molise	116	28	87	0	1	0	0	0,80%
Piemonte	1038	237	751	22	16	10	2	7,14%
Puglia	956	182	745	4	17	5	3	6,58%
Sardegna	522	260	247	1	7	5	2	3,59%
Sicilia	744	100	616	5	13	2	8	5,12%
Toscana	726	217	449	34	11	9	6	4,99%
Trentino-Alto Adige	318	149	156	3	9	1	0	2,19%
Umbria	308	54	241	5	5	1	2	2,12%
Valle d'Aosta	34	15	19	0	0	0	0	0,23%
Veneto	1416	393	933	47	22	11	10	9,74%
Tot.	14536	3267	10544	305	227	112	81	100%

Tabella 4: Punti di raccolta batterie su territorio italiano (Fonte: CDCNPA)

Leggendo la tabella regione per regione, è possibile riconoscere un disegno chiaro: nel Mezzogiorno il CDCNPA raccoglie molto meno di quanto ci si aspetterebbe, se il totale fosse ripartito in base alla popolazione [41].

Sicilia e Calabria sono i casi più evidenti (intorno a -80%), ma anche Campania e Puglia segnano scarti marcati. Qui il messaggio non è “si ricicla poco” in assoluto: è che la quota intercettata dal consorzio è bassa rispetto al peso demografico [41]. Le cause plausibili sono tre: rete di conferimento meno capillare, flussi che escono verso regioni vicine più “attrezzate”, e una parte di conferimenti che finisce su altri operatori.

Al Centro-Nord succede l'opposto. Veneto, Trentino-Alto Adige, Toscana, Lazio e Lombardia stanno ben sopra l'atteso [41]. Questo di solito accade quando la rete è densa e funziona (più punti dove conferire, più ritiri effettivi), e quando la regione attira flussi dall'esterno: pendolarismo, aree metropolitane, logistiche che concentrano i conferimenti anche di chi non risiede lì.

Ci sono eccezioni: la Liguria resta sotto, l'Umbria è praticamente in linea, la Sardegna ha uno scarto più contenuto [41]. Nel complesso, però, il pattern è stabile. Tradotto in operatività: dove siamo sotto il recupero atteso bisogna lavorare sulla copertura territoriale e sulla facilità di conferimento; dove siamo sopra, ha senso verificare se stiamo assorbendo flussi di altre regioni (e con quali effetti sulla programmazione nazionale).

Nella Tabella 4, è riportata la distribuzione territoriale dei punti di raccolta (totale e per tipologia: centri comunali, distribuzione, assistenza tecnica, stoccaggio, impianti RAEE e grandi utilizzatori). [41]

Il primo elemento che emerge è che, la rete, è inevitabilmente più concentrata nelle regioni più grandi e urbanizzate: Lombardia, Lazio, Veneto, Campania, Piemonte e Puglia. In altre parole, in termini assoluti sembrerebbe che, dove ci sono più abitanti, ci sono anche più punti di raccolta autorizzati [41]. La componente preponderante, in generale, sono i negozi/canali commerciali, quindi la “distribuzione, mentre i centri comunali rappresentano una quota più contenuta ma strategica per l'accesso “pubblico” al conferimento.



Figura 9: Mappa tematica della distribuzione dei centri di raccolta per regione (Fonte dati: CDCNPA)

La relazione con i risultati della tabella precedente (Tabella 3) è importante e non banale, il numero totale dei punti di raccolta per regione spiega solo in modo parziale le differenze di performance del CDCNPA, ci sono regioni con molti punti di raccolta, che restano con un raccolto sotto-atteso e viceversa, ci sono delle regioni con minor numero di centri di raccolta, che invece hanno un raccolto sovra-atteso

[41].

Riusciamo a spiegare questo comportamento guardando i centri di raccolta comunali, le regioni nelle quali si misurano gli scostamenti più negativi nel Mezzogiorno coincidono anche con quelle dove la densità di centri comunali è tra le più basse (Sicilia e Calabria in modo evidente, seguite da Campania e Lazio) [41], il che è coerente con l'interpretazione "copertura territoriale meno capillare = minore intercettazione consortile" rispetto al peso demografico. In Figura 9 è riportata la mappa tematica della distribuzione dei centri di raccolta per regione.

Nelle regioni del Nord / Centro-Nord, notiamo alcune regioni con raccolto sopra-atteso, questo perché andando di nuovo a guardare i dati dei punti di raccolta della rete comunale, notiamo che questa risulta essere più fitta, strutturata [41], ed inoltre, possiamo ipotizzare che nelle regioni del settentrione, vista la grande quantità di industrie sul territorio, ci sia una rete logistica più strutturata di quella delle regioni del meridione.

Tuttavia, si riscontrano eccezioni rilevanti in regioni come Sardegna e Molise, dove la semplice capillarità dei centri di raccolta comunali non è sufficiente; è infatti determinante l'effettivo tasso di utilizzo delle strutture. Fattori quali la frequenza dei ritiri, l'accessibilità, l'incidenza dei canali di raccolta alternativi o i flussi logistici tra regioni diverse (che possono alterare la contabilizzazione dei dati) richiederebbero un'analisi più approfondita. Tali variabili permetterebbero uno studio più puntuale [41], sia per i casi anomali sia per le regioni in cui si è cercato di contestualizzare le attuali percentuali di raccolta.

Queste tabelle insieme suggeriscono che la carenza di centri comunali potrebbe essere un indicatore più sensibile per spiegare il sotto-intercettamento in alcune regioni, ma che la performance del CDCNPA dipende anche da fattori organizzativi e di “attrazione” dei flussi (logistica, grandi utilizzatori), oltre che dalla sola numerosità dei punti autorizzati [41].

6.6 Scaling su base annua nazionale a partire dai dati di raccolta

Fino ad ora in questa tesi l’analisi di filiera si è limitata (attraverso la formalizzazione MEIO) solo alle fasi di riciclo vero e proprio, quindi Trattamento a Microonde, Lisciviazioni e Filtraggio [69]; adesso, andremo a collegare i dati sperimentali di laboratorio, alla raccolta delle batterie, e quindi passeremo da dati sperimentali ad un ordine di grandezza di sistema su base nazionale.

Come anticipato, quindi, come riferimento quantitativo abbiamo utilizzato i dati di raccolta annuale delle batterie portatili in Italia: nel 2024 risultano raccolti complessivamente 10.383.926 kg, somma di un flusso coordinato direttamente dal CDCNPA (5.352.761 kg) e di una raccolta dichiarata dai consorziati (5.031.165 kg) [41].

A valle della raccolta, per le batterie a litio, la filiera prevede una fase di messa in sicurezza, tramite la scarica delle batterie [5], seguita dal disassemblaggio (separazione di pacchi/moduli/celle e rimozione delle componenti non elettrochimiche) [17], introdotto per ridurre il rischio di cortocircuiti e incendi e rendere il materiale idoneo alle fasi successive, rimozione di materiali organici e poi triturazione (ed eventuali pretrattamenti), che è la fase che ci porta alla vera e propria produzione di black mass [69].

Idealmente, se ad oggi avessimo una filiera ben consolidata, potremmo assumere circa 10 milioni di kg di batterie riciclate [41], da questi 10 milioni di kg di batterie, attraverso la formalizzazione MEIO, possiamo, cambiando attentamente i parametri in ingresso, risalire alla quantità di materiali critici riciclati e pronti per una successiva organizzazione di nuove celle [45]. Di seguito, la Tabella 5 ci indica la quantità di litio e altri materiali recuperati dal processo [69].

Il recupero percentuale dei metalli target è inevitabilmente basso, da 10 milioni di kg di batterie riciclate, sono recuperati circa 101.000 kg di Li, 350.000 kg di Cu, e Ni e Co rimangono *intrappolati* nei residui solidi [69].

Ovviamente, queste quantità recuperate sono compatibili con il fatto che le batterie non sono fatte solamente di materiali preziosi, ma una quota non indifferente del peso di queste è formata da collettori, involucro, separatori, polimeri, elettrolita e frazioni inerti [17]. Inoltre, anche la parte attiva non coincide con un singolo metallo, ma con ossidi complessi e miscele [69].

Attività	Scarica		Disassemblaggio		Rimozione Organici		Triturazione		Trattamento a Microonde		Lisciviazione in acqua		Filtraggio vacuum		Lisciviazione in acido malico		Filtraggio		Evaporazione con Rotavapor		
	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output	
Risorse																					
Batterie Eol (Kg)	10000000	10000000	10000000		9950000		8761970														
Perdite Operative (Kg)				50000																	
Elettrolita Rimosso (Kg)						993010															
PVDF Rimosso (Kg)						195020															
Assunzione Cu in Batterie Eol							350000														
Cu Recuperato (Kg)								335650													
Black Mass 1 - MW (Kg)									4213160			3791844									
Black mass 2 (Kg)									4213160			2738554									
Perdite BM1 (Kg)										421316											
Perdite BM2 (Kg)										1474606											
Acqua BM1 (Kg)											94796100										
Acqua BM2 (Kg)											68463850										
Estratto (Soluzione con litio) (Kg) BM1												94861320	94861320								
Estratto (Soluzione con litio) (Kg) BM2												68510953	68510953								
Residuo solido (ricco di cobalto, tracce di litio, manganese e nichel) (Kg) BM1												3726624	3726624	3164673	3164673						
Residuo solido (ricco di cobalto, tracce di litio, manganese e nichel) (Kg) BM2												2691451	2691451	2285597	2285597						
Residuo scartato (kg) BM1														561951							
Residuo scartato (kg) BM2														405854							
Acqua di scarto (Solvente con tracce di Litio) BM1														94634567			94634567				
Acqua di scarto (Solvente con tracce di Litio) BM2														68347188			68347188				
Polvere Litio (Kg) BM1														59153							
Polvere Litio (Kg) BM2														42721							
Acqua evaporata (Kg) BM1														167600							
Acqua evaporata (Kg) BM2														121044							
Li/Al-LDHs (idrossidi doppi stratificati) BM1																	61512				
Li/Al-LDHs (idrossidi doppi stratificati) BM2																	44426				
Leachate 3 BM1																	94573055		94573055		
Leachate 3 BM2																	68302762		68302762		
CaCO3 BM1																				501237	
CaCO3 BM2																				362005	
H2O BM1																				94071818	
H2O BM2																				67940757	
Acqua (Kg) (98.5% della soluzione) BM1															77930073					0	
Acqua (Kg) (98.5% della soluzione) BM2															56282830						
Peroxido di idrogeno (kg) (1.5% della soluzione) BM1															1317295						
Peroxido di idrogeno (kg) (1.5% della soluzione) BM2															951380						
Acido malico (1.2 M) (kg) BM1															12539572						
Acido malico (1.2 M) (kg) BM2															9056358						
Acqua di scarto da lisciviazione con malico (kg) BM1																					
Acqua di scarto da lisciviazione con malico (kg) BM2																					
Estratto (Soluzione con litio, Nichel, Cobalto, Manganese) (Kg) BM1																	92642351				
Estratto (Soluzione con litio, Nichel, Cobalto, Manganese) (Kg) BM2																	66908365				
Residuo solido BM1																	2309262				
Residuo solido BM2																	1667800				

Tabella 5: Resource Activity MEIO, ipotesi dati 'reali'; input 10.000 t

In Figura 10 è riportata in peso percentuale la quantità dei vari materiali all'interno delle celle [68] [17].

From: Raw Materials and Recycling of Lithium-Ion Batteries

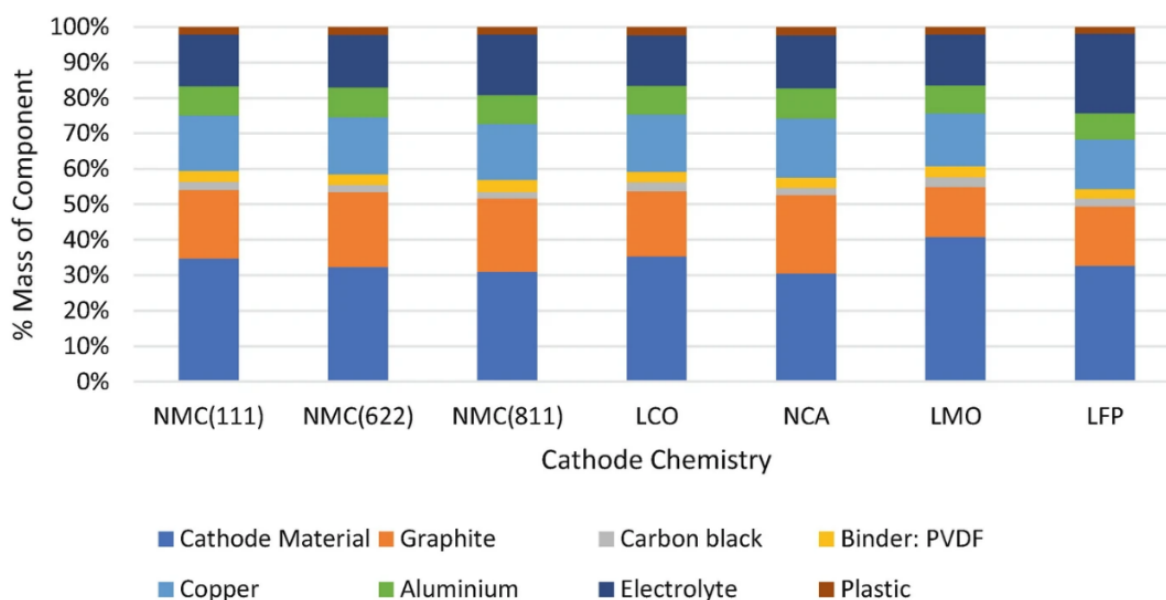


Figura 10: Materiali critici in % per ogni tipologia di batteria (Fonte: [68])

Quindi, con la formalizzazione RA MEIO, sono state quantificate per ciascuna fase della filiera le principali correnti in ingresso ed in uscita, rendendo espliciti: materiali, reagenti, acqua, etc. [45]

Questa rappresentazione è utile perché è ancora il modello a grandezze misurabili e confrontabili, ma, da sola, non descrive ancora in modo completo come le diverse attività siano collegate tra loro e in che modo un output diventi l'input della fase successiva.

Per questo motivo di seguito, andiamo a prendere in considerazione la formalizzazione tramite la tabella RF MEIO, nella quale vengono esplicitate le relazioni tra i vari flussi che attraversano la filiera [45]. Nelle Tabelle 6 e 7 il processo viene descritto come una catena di trasformazioni interdipendenti, si chiarisce meglio quali attività precedono e abilitano le successive (ad esempio dal disassemblaggio alla produzione di black mass, ai trattamenti di estrazione e separazione), quali flussi fungono da collegamento tra le fasi, e in che modo eventuali alternative di processo (ad esempio black mass con o senza pretrattamento termico) generino percorsi paralleli che si ricongiungono o divergono nella struttura complessiva [46] [47]. In altre parole, la formalizzazione RF-MEIO permette di leggere la filiera come un sistema organizzato, in cui i passaggi sono legati da dipendenze funzionali e vincoli di input/output [45].

Una volta definita questa struttura relazionale, l'analisi può essere estesa verso una prospettiva di chiusura del ciclo, l'obiettivo è quello di capire in che misura i materiali recuperati (in particolare litio, nichel, cobalto e rame) possano essere reindirizzati verso la produzione di nuove celle, e quali elementi manchino per completare uno schema [11].

In questo quadro, una criticità che emerge è la disponibilità della componente carboniosa necessaria per la realizzazione dell'anodo; per questo motivo, consideriamo l'integrazione della filiera appena descritta, con la filiera del biocarbonio, una possibile fonte alternativa di carbonio [55].

In questo modo, la formalizzazione RF MEIO diventa il ponte tra (i) la quantificazione dei flussi di riciclo e (ii) la valutazione della fattibilità, almeno a livello concettuale e di ordine di grandezza, di una filiera integrata orientata alla produzione di nuove celle a partire da materiali secondari [45].

6.7 Dal recupero dei metalli alla produzione di celle: contributo del biocarbon

A conclusione dell'analisi di riciclo, consideriamo la chiusura del ciclo "da batteria a batteria", intesa come l'utilizzo dei materiali recuperati (in particolare: Li, Ni, Co e Cu) come input per la produzione delle nuove celle [11]. Nel progetto AMELIE l'attenzione è rivolta allo sviluppo di filiere a ciclo chiuso e, oltre alle tecnologie sviluppate per il recupero dei metalli, è prevista anche la conversione di rifiuti organici (ad es. legno) in biocarbone mediante pirolisi, come elemento abilitante per strategie circolari e di decarbonizzazione [44].

Tuttavia, non è stata realizzata sperimentalmente la fabbricazione di nuove celle a partire dai materiali recuperati: la discussione che segue ha quindi carattere ipotetico, basato su assunzioni coerenti con la letteratura e su indicazioni qualitative raccolte tramite confronto con il Prof. Mapelli (Politecnico di Milano, partner del progetto AMELIE).

Studiamo l'integrazione della filiera del biocarbonio/biochar perché nella costituzione di una nuova cella, non basta la disponibilità dei metalli del catodo, ma è necessaria anche la parte carboniosa di questo, e più in generale è necessario sostituire il carbonio fossile lungo la filiera [11] [44]. Per questo ambito, i lavori del Prof. Mapelli offrono un supporto utile per la definizione di come si produce un carbonio alternativo e quali parametri di qualità lo caratterizzano, in vista dell'impiego industriale.

Un primo studio di riferimento è quello sulla pirolisi termo-catalitica del metano (TCMP) per ottenere carbonio solido e idrogeno, dove l'acciaio inox viene impiegato come reattore e al contempo come superficie catalitica, e l'iniezione di CO₂ è proposta per la rigenerazione del sistema e la riduzione dei fenomeni di clogging (causati da materiale che si attacca alle pareti) [55]. Il lavoro è rilevante non perché produca biochar, ma perché mostra che è possibile progettare una filiera di produzione di carboni solidi con morfologia e grado di grafitizzazione modulabili e con un orientamento esplicito alla valorizzazione industriale del carbonio (anche in ambito metallurgico) [55].

Un secondo studio, riferito direttamente al biochar, e quindi in qualche modo più rilevante, è il contributo su bio-CCAs (biogenic carbon composite agglomerates) basati su biochar e residui metallurgici (ad es. mill scale), in cui viene modellato il grado di riduzione (DoR) in funzione della temperatura e di proprietà elementari del biochar [60]. In particolare, gli autori confermano un andamento sigmoide del DoR con la temperatura e utilizzano una forma linearizzata tipo Avrami per ricavare parametri di regressione, mostrando che tali parametri seguono un trend asintotico rispetto al rapporto fixed carbon / volatile matter [60].

Per collegare questa filiera del carbonio alla produzione di celle, ci appoggiamo alla letteratura specifica sulla produzione di batterie: lavori recenti discutono su come il biochar/biocarbonio possa essere un valido potenziale materiale carbonioso per elettrodi, evidenziando opportunità e limiti, quali: porosità, disordine strutturale, contenuto di ceneri/impurezze, stabilità ciclica e necessità di trattamenti [63].

Esistono inoltre studi sperimentali legati a materiali di partenza differenti (ad esempio il bambù) che valutano biochar da biomassa come materiale anodico per batterie agli ioni di litio, con caratterizzazioni e test elettrochimici [64].

In questa tesi i risultati sono stati usati quindi come prova che l'integrazione tra le filiere è fattibile in linea di principio, i metalli recuperati possono essere trasformati in materiali utili per il catodo, mentre la filiera del biocarbonio può fornire la parte carboniosa (per l'anodo) riducendo la dipendenza da grafite e carbonio fossile [11] [55] [60].

6.8 Adeguamento industriale alle normative UE sul riciclo delle batterie

Dal 2023, le nuove norme europee prevedono il riciclo delle batterie agli ioni di litio. Come conseguenza, quindi, in Europa sta nascendo un nuovo settore, capace di generare un volume di affari pari a circa 6 miliardi di euro all'anno [11].

Ad oggi la sfida con i concorrenti industriali sembra quasi nulla, perché in Italia almeno, la mobilità elettrica sembra ancora un fenomeno di nicchia, ma secondo la società di consulenza Ernst&Young, entro il 2030 le vendite di veicoli elettrici supereranno quelle di auto con motori a combustione [58]. Entro il 2045, le macchine diesel e benzina rappresenteranno solo l'1% del totale a livello globale [59].

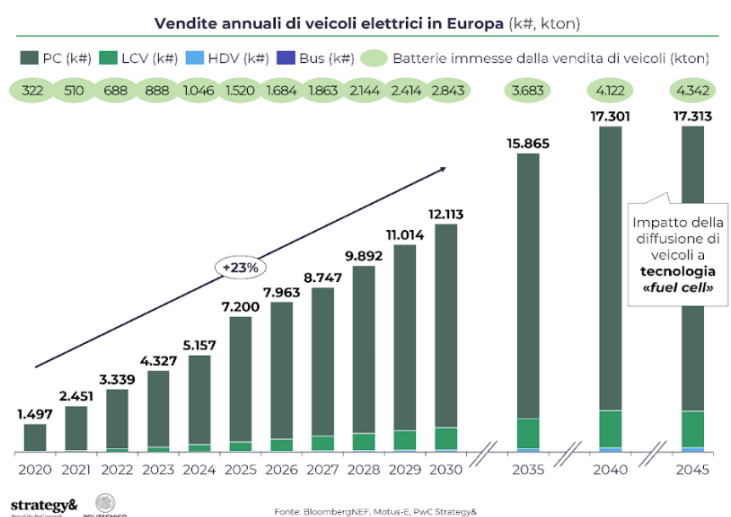


Figura 11: Previsioni delle vendite di veicoli elettrici in Europa (Fonte: [61])

L'Italia al momento non ha all'attivo molti impianti per il riciclo di batterie a litio. Fino al 2023 più grandi impianti di riciclo d'Europa si trovavano in Germania, Francia, Belgio, Svizzera, Finlandia, Regno Unito, ma nessuno di questi era pensato per il trattamento di batterie agli ioni di litio [61], l'aumento vertiginoso della capacità di

riciclo necessaria per soddisfare la domanda (pari a 3,4 milioni di tonnellate di batterie all'anno, cioè quasi 50 volte quella attuale), ha portato a costruire nuovi impianti e dunque a far crescere esponenzialmente gli investimenti.

Per intercettare tutti i volumi generati sul territorio europeo, la stima è di investimenti pari a circa 2,6 miliardi di euro, di cui 283 milioni destinati al mercato italiano [61].

L'impianto Cobat Ecofactory di Pollutri (CH), in Abruzzo, operativo dall'inizio del 2025 [56], costituisce un'infrastruttura strategica per la transizione energetica e digitale del Paese. Nel panorama nazionale, l'avvio del sito rappresenta un tassello fondamentale: la struttura integra processi avanzati di selezione granulometrica e chimica dei flussi in ingresso e, secondo le fonti di settore [57], è attrezzata per il trattamento delle pile alcaline.

Si chiama BATMAN (Battery Treatment and Management) ed è il progetto che punta a creare il primo hub nazionale per il riciclo delle batterie esauste [56]. Presentato da Haiki+, holding attiva nei settori Ambiente ed Economia Circolare, con la collaborazione dell'Università dell'Aquila e Smart Waste Engineering, ha ottenuto dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica un finanziamento di 1,2 milioni di euro, a fronte di un investimento

complessivo di 1,94 milioni [56] [57]. L'obiettivo è la creazione del primo hub industriale nazionale per il trattamento di pile e accumulatori al litio e alcalini, con il recupero di materie prime critiche come litio, cobalto, nichel, manganese, rame, alluminio e grafite [56] [57].

7. Risultati dell'esperimento e raccomandazioni manageriali

Il capitolo riporta i risultati costruiti nel Capitolo 6 con l'obiettivo di chiarire il significato e trasformare l'esperimento dalla mera ricostruzione della filiera, ad indicazioni operative. In continuità con l'impostazione adottata, interpretiamo i risultati in chiave comparativa: per ciascuno scenario vediamo come variano i flussi principali, come cambiano le percentuali di recupero dei materiali di interesse [45].

Poniamo l'attenzione su quelli che sono stati identificati come materiali critici presenti nelle batterie, e primo fra tutti, il litio. La scelta di dedicare a questo materiale un focus specifico è dettata dal fatto che: (i) il litio è il materiale chiave per il tipo di batterie che stiamo studiando, e quindi, elemento chiave della transizione energetica e, (ii) nel quadro regolatorio europeo più recente (Regolamento (UE) 2023/1542) il litio è oggetto di target di recupero a fine vita, rendendo particolarmente rilevante il confronto tra i risultati ottenuti [11].

Per questo motivo, il recupero di litio funge da filo conduttore per interpretare le performance della catena, pur non dimenticando di mantenere una visione complessiva su tutta la catena di recupero.

7.1 Scenari analizzati, dati e criteri di confronto

Gli scenari discussi in questo capitolo riprendono la Tabella 5, e vanno a differenziare i risultati ottenuti con le diverse black mass. Per garantire confrontabilità tra i risultati, questi, saranno normalizzati in forma di percentuale di recupero [45]. Ai fini del calcolo, si definiscono le seguenti grandezze:

- Massa di metallo critico in ingresso (stimata dalla letteratura, in base alla composizione della black mass assunta, Figura 7) [17];
- Massa recuperata nello schema sperimentale (ovvero trasferita nella corrente considerata come recupero nel perimetro definito) [69];
- Massa "residua", nelle soluzioni o nei residui solidi e che, a seconda dello scenario, può essere considerata perdita effettiva oppure massa potenzialmente recuperabile in passaggi successivi [69].

Questa distinzione è particolarmente importante perché una quota di materiali può rimanere in soluzione anche dopo lisciviazione e filtraggio, dove però non abbiamo, purtroppo, la percentuale esatta dei metalli che rimangono in soluzione [69].

Inoltre, un ulteriore aspetto di incertezza che attraversa tutti gli scenari, è la composizione della black mass, la quale, come anticipato, nel lavoro sperimentale non è stata prodotta internamente ma acquistata da aziende esterne, le quali non hanno fornito dei dati puntuali a monte. La mancanza di dati puntuali sulla composizione della black mass ha fatto sì che questa fosse assunta a partire da dati disponibili e non determinata analiticamente ad ogni lotto [69].

Questo elemento non invalida l'analisi, ma ne condiziona l'interpretazione: i risultati vanno letti come stime coerenti con le assunzioni dichiarate e come indicazioni utili a identificare trend, colli di bottiglia e priorità di miglioramento [45] [46].

7.2 Risultati sul litio: confronto tra pretrattamento a microonde e assenza di pretrattamento

Guardando ai risultati della tabella RA MEIO e trasformando i dati disponibili in percentuali di recupero, si osserva che: nello scenario in cui la black mass viene sottoposta a pretrattamento a microonde, la quota di litio recuperata ammonta al 36% del contenuto totale di litio (stimato) contenuto nella black mass [69].

Questo dato deve essere interpretato con attenzione, rappresenta infatti il recupero di litio ottenuto nel perimetro sperimentale considerato (che si arresta al filtraggio post lisciviazione in acqua e post lisciviazione in acido malico), infatti, in questo scenario, una parte di litio rimane intrappolato nelle soluzioni dopo lisciviazione e filtraggio [69].

Ciò detto, quindi, andiamo a identificare due risultati differenti:

- il 36% di litio recuperato “effettivamente” nella configurazione attuale [69];
- la quota di litio che rimane in soluzione, non ancora realizzato, ma potenzialmente recuperabile attraverso passaggi successivi [69].

Il valore del 36% di litio recuperato, dipende dall'assunzione sulla composizione della black mass. È importante chiarire che, nel caso in cui la massa di litio presente all'interno della black mass utilizzata in laboratorio fosse minore di quella ricavata dalla letteratura, la percentuale di recupero aumenterebbe, mentre se il contenuto reale di litio in ingresso fosse più alto di quello

ipotizzato, la percentuale di recupero risulterebbe più bassa a parità di litio effettivamente intercettato [69].

In altre parole, questo 36% va letto come un risultato valido dentro le ipotesi adottate, ma sensibile al contenuto reale di litio in ingresso. Proprio per questo, se l'obiettivo è produrre evidenze solide, il punto chiave è uno: serve conoscere meglio l'input. Ridurre incertezze e asimmetrie informative sulla composizione della black mass è una condizione necessaria per rendere le stime di recupero davvero affidabili e confrontabili [46].

Guardando alla normativa europea, il recupero del litio è un punto esplicitamente monitorato, il Regolamento (UE) 2023/1542 prevede per il litio un target di recupero dei materiali pari ad almeno 50% entro il 31 dicembre 2027 e 80% entro il 31 dicembre 2031 [11]. Si osserva che un recupero del 36% è inferiore al primo traguardo richiesto; tuttavia, il gap che separa dall'obiettivo non va letto come una bocciatura del processo, o come un'inefficienza, ricordiamo ancora che nel processo permangono delle soluzioni nelle quali ci sono residui di litio, e quindi, la Tabella 5 stessa ci suggerisce che:

- Una parte del gap potrebbe essere colmata aumentando l'efficienza della fase principale;
- Un'altra parte, potrebbe essere colmata progettando passaggi dedicati al recupero del litio dalla fase liquida [69].

Questo è un punto chiave: l'analisi indica anche dove si colloca il margine di recupero. E questo rende il risultato del 36% un punto di partenza credibile, perché non è un valore isolato: è accompagnato da una direzione di miglioramento coerente con i flussi osservati.

Passiamo adesso alla discussione dei risultati nello scenario senza pretrattamento a microonde: in questo caso, la percentuale di litio recuperata risulta ancora più bassa rispetto allo scenario con pretrattamento, parliamo di litio recuperato al 26% [69].

Nel complesso i dati ci suggeriscono che, come già ipotizzato nella discussione a monte, i pretrattamenti ai quali è soggetta la black mass possono influenzare significativamente la capacità complessiva di filiera di intercettare il litio [51] [69].

I risultati confermano che lo scenario microonde fornisce una base più positiva sul litio rispetto allo scenario senza microonde, pur rimanendo entrambi vincolati al fatto che il perimetro

dell'analisi laboratoriale si arresta al filtraggio e che una parte del litio rimane in soluzione [69].

7.3 Evidenze e risultati su altri metalli

Riportando i risultati riportati nella Tabella RA MEIO, emerge che, oltre al litio, anche gli altri metalli presenti vengono redistribuiti in misura non trascurabile tra i diversi flussi del processo [69]. Tuttavia, per i metalli diversi dal litio, il livello di dettaglio disponibile risulta necessariamente più limitato per due ragioni principali:

1. Focus della trattazione: coerentemente con gli obiettivi della tesi e con la direzione indicata dalla normativa europea [11] (che attribuisce al litio un ruolo centrale in termini di target e monitoraggio), l'analisi viene sviluppata con maggiore profondità proprio su questo metallo, assunto come riferimento principale del caso studio;
2. Limiti del dataset e del perimetro sperimentale: il perimetro di osservazione si arresta al filtraggio e, di conseguenza, molte correnti in uscita (in particolare soluzioni ed estratti) non sono ulteriormente trattate né completamente caratterizzate nel dataset fornito [69]. Ne deriva che, per una parte dei metalli, non è possibile ricostruire con la stessa puntualità la ripartizione complessiva [69].

In altri termini, per gli altri metalli, la Tabella 5 fornisce un'informazione preziosa soprattutto sotto il punto di vista di mappa di distribuzione dei flussi: indica in quali correnti si concentra il metallo e dove possono collocarsi potenziali perdite o recuperi addizionali [69].

Anche qui torna un tema già visto per il litio: una parte della materia non è necessariamente persa, ma si trova in flussi intermedi che, in uno schema più completo, potrebbero essere ulteriormente trattati. Un ulteriore elemento che limita la lettura dei risultati è la composizione non sempre perfettamente caratterizzata di alcuni flussi (estratti, soluzioni, residuo solido associato a specifiche black mass) [69].

Questo punto è tutt'altro che secondario: se la composizione dei flussi non è nota con sufficiente confidenza, la chiusura dei bilanci di massa per ciascun metallo perde precisione. Per questo motivo, la conclusione che si può trarre è che la trattazione consente un recupero apprezzabile anche per altri metalli, ma che una valutazione di resa finale per ciascun metallo

richiederebbe (i) un perimetro di processo più esteso oltre il filtraggio e (ii) una caratterizzazione analitica più completa delle correnti in uscita.

7.4 Hotspot e robustezza dei risultati

Il confronto tra i vari scenari e risultati consente di identificare alcuni hotspot che influenzano la performance complessiva:

- Variabilità dell'input (black mass): composizione non puntuale, possibile contaminazione, differenze tra lotti diversi [69];
- Gestione delle soluzioni: presenza di metalli che rimangono intrappolati in fase liquida dopo il filtraggio [69];
- Perdite operative: trasferimenti, filtraggio, trattenimento dei metalli nei residui solidi, che possono incidere in maniera rilevante sulle spese relative [45].

La robustezza dei risultati in generale è più alta quando l'informazione deriva direttamente da misure sperimentali e puntuali, come concentrazioni delle soluzioni e masse effettivamente raccolte in una certa corrente, e si riduce quando dipende da assunzioni [46].

Per la tesi possiamo riconoscere due risultati:

- Risultati solidi, trend tra scenari, struttura dei flussi;
- Risultati condizionati: valore delle percentuali di recupero, valore delle percentuali di metalli in ingresso, ecc. [69]

7.5 Implicazioni manageriali e di policy-making: come migliorare recupero e controllabilità della filiera con il passaporto digitale per batterie

Un modo per poter ridurre l'incertezza sull'input potrebbe essere quello di avere una filiera più controllata e collegata. Dai risultati abbiamo tratto che, quando la composizione della black mass è assunta e non puntuale, diventa più difficile interpretare le percentuali di recupero e capire fino a che punto si sta recuperando il materiale critico.

Dal punto di vista manageriale, la trattazione ci suggerisce che l'efficienza del recupero non dipende esclusivamente dai flussi ed i processi chimici per il recupero, ma anche dalle pratiche di filiera: una standardizzazione dei lotti, delle procedure o ancor di più un aumento della tracciabilità e condivisione di informazioni tra i vari attori della filiera migliorerebbe le performance.

In termini di definizione delle politiche, questi punti appena descritti possono tradursi in leve per incentivare la qualità e la tracciabilità della raccolta. In questa prospettiva, ci viene in aiuto uno strumento pensato proprio per la tracciabilità delle batterie nella filiera: passaporto digitale delle batterie [11] [62].

Il passaporto digitale delle batterie (Digital Battery Passport) introdotto dal nuovo quadro regolatorio UE sulle batterie, è pensato come un registro elettronico per raccogliere e condividere informazioni chiave come: prestazioni, sostenibilità, etc. Dal 2027 il passaporto digitale diventerà obbligatorio per alcune categorie (batterie per veicoli elettrici, batterie industriali >2 kWh e batterie per mezzi di trasporto leggeri), con l'obiettivo di ridurre asimmetrie informative che oggi limitano riparazione, riuso e riciclo [11] [62].

Il passaporto contiene sia dati pubblici sia informazioni riservate, accessibili esclusivamente alle autorità competenti o a soggetti autorizzati in presenza di specifici requisiti. Nella sezione dei dati pubblici rientrano: dati su produttore, categoria, capacità e composizione (incluse sostanze pericolose e materie prime critiche), la dichiarazione dell'impronta di carbonio, ed elementi su approvvigionamento responsabile legati agli obblighi di dovuta diligenza, al contenuto riciclato e alla quota di energia da fonti rinnovabili. Completano il quadro le informazioni relative alla prevenzione e alla gestione dei rifiuti di batterie [11] [62].

Per supportare concretamente operatori della circolarità, il passaporto digitale include anche informazioni più operative utili a smontaggio e trattamento, come dettagli su composizione, disassemblaggio (ad es. strumenti necessari) e misure di sicurezza. Per la batteria individuale, i soggetti autorizzati potranno accedere a parametri di prestazione e durabilità, allo Stato di Salute (SOH), allo stato della batteria (es. originale/utilizzata/rifiuto) e a dati d'uso (numero di cicli, eventuali incidenti) [11] [62].

L'accesso ai dati avverrà tramite QR Code collegato ad un codice identificativo univoco associato dall'operatore economico che immette la batteria sul mercato, responsabile anche di verifica, aggiornamento e conservazione dei dati.

Quando la batteria diventa rifiuto, alcune responsabilità si trasferiscono al produttore o all'operatore di gestione rifiuti. Il regolamento richiede inoltre che i dati siano basati su standard aperti e in formati interoperabili [11] [62].

In conclusione, possiamo affermare che il passaporto digitale per batterie è sostanzialmente un facilitatore di filiera: collega raccolta, utilizzo, recupero e reporting, in modo tale che la catena

sia il più trasparente possibile; soprattutto in un contesto dove i target di recupero e requisiti di sostenibilità diventano sempre più stringenti [11] [62].

7.6 Implicazioni per la ricerca: dalle prove di laboratorio alla scala industriale

Lavorare in laboratorio con 0.1 kg di black mass è un passaggio necessario per costruire il flusso di processo, proprio perché è l'unica soluzione perseguibile (a livello economico), controllabile, e che permette di testare il processo in maniera più rapida. Tuttavia, i dati di laboratorio hanno un limite intrinseco: alcuni risultati che a piccola scala risultano poco praticabili potrebbero essere rilevanti quando si passa a volumi maggiori.

In particolare, il tema delle economie di scala è centrale: all'aumentare della capacità, alcuni costi e sprechi relativi tendono a diminuire rendendo più controllabili le condizioni operative. Questo vale sia sul piano tecnologico, sia sul piano pratico della misura, recuperare e gestire quantità molto piccole è più vulnerabile a perdite e dispersioni. Sarebbe necessario prevedere e progettare degli esperimenti intermedi a volume aumentato che possano permettere di distinguere ciò che dipende dalla scala laboratoriale e ciò che rappresenta dei limiti effettivi del processo.

Il collegamento con i risultati discussi nel capitolo è diretto: in scala laboratoriale quota dei metalli critici e dei target di processo rimane intrappolato all'interno di soluzioni e residui. In laboratorio, mantenere un circuito realmente chiuso è poco efficiente, e non rappresentativo, e addirittura potrebbe influenzare negativamente i risultati; su scala industriale, invece, è realistico progettare sistemi dedicati al recupero dei liquidi e riciclo delle soluzioni, con un impatto sia sulla riduzione degli sprechi sia sull'aumento della resa complessiva. In altre parole, quello che in scala laboratoriale potrebbe essere un flusso non recuperato, potrebbe diventare recuperabile all'aumentare dei volumi e delle integrazioni con le altre fasi di processo.

Queste considerazioni sono volte anche alla sostenibilità complessiva della filiera: per far sì che un sistema di riciclo sia realmente preferibile alla produzione primaria, il consumo di energia e risorse deve rimanere contenuto e, soprattutto, deve essere coerente con l'obiettivo di ridurre l'impronta materiale ed energetica del prodotto finale. Ne consegue che la ricerca non deve concentrarsi solo sulla resa di recupero dei materiali, ma anche sull'efficienza del processo nel suo insieme.

In termini di implicazioni per la ricerca, emergono due strade complementari: da un lato, è necessario valutare il processo in condizioni più vicine alla scala industriale, attraverso un incremento dei volumi trattati e una sperimentazione su quantità maggiori, così da osservare in modo più realistico la stabilità delle operazioni, la gestione delle correnti e le possibilità di integrazione e recupero a valle; dall'altro lato, è altrettanto centrale investire nella caratterizzazione puntuale dell'input: ridurre l'incertezza e la variabilità della composizione della black mass significherebbe ridurre di conseguenza anche la variabilità dell'output e rendere i bilanci di massa e le stime di recupero più affidabili.

In questa prospettiva, volumi maggiori e input meglio caratterizzati non rappresentano due linee separate, ma condizioni che devono convivere per ottenere risultati più solidi.

8. Conclusioni

Questa tesi affronta il tema del recupero dei metalli critici contenuti all'interno delle batterie agli ioni di litio a fine vita, con l'obiettivo di rendere la catena del riciclo: chiara, tracciabile, analizzabile, ed efficiente.

Il lavoro si colloca in un'epoca in cui la transizione energetica e l'elettrificazione dei trasporti sono parte della vita quotidiana e che aumentano nel tempo in modo significativo la domanda di materie prime, strategiche. In questo scenario, lo sviluppo di filiere del riciclo risponde a due bisogni distinti: da un lato, contribuire alla riduzione degli impatti ambientali e migliorare la gestione dei rifiuti (in questo caso, rifiuti altamente pericolosi); dall'altro lato, risponde all'esigenza di una riduzione di dipendenza da aree soggette a limitazioni geografiche, economiche, ed in questo periodo storico, geopolitiche.

Inoltre, la richiesta sempre maggiore di batterie, e quindi di conseguenza di metalli critici, rende importante costruire delle soluzioni operative che possano essere efficienti, ancor di più, realizzabili in tempi brevi.

All'interno di un quadro già così delicato, la tesi prende come riferimento il progetto AMELIE [44], nato dall'esigenza di trovare una soluzione quanto più efficiente possibile, sia in termini economici che in termini ambientali, per il recupero dei materiali (metalli) critici presenti nelle batterie esauste, e per l'impostazione di una filiera che possa essere replicabile, robusta.

Il lavoro è stato articolato in tre componenti: in primo luogo abbiamo analizzato il caso studio AMELIE, ne abbiamo definito il perimetro e le fasi che lo compongono, delimitato il perimetro del progetto, e identificato gli output di interesse lungo la filiera [44].

In secondo luogo, abbiamo utilizzato la formalizzazione MEIO per la formalizzazione della conoscenza, ed i flussi della filiera: attraverso tale schema, i processi e le relazioni (sia derivati dalla letteratura o reali) sono stati organizzati in modo sistematico, rendendo più leggibile la complessità (naturale) della catena che comprende diversi attori, processi, limiti operativi e variabili [45].

I risultati osservati nei precedenti capitoli confermano che l'utilizzo di questa formalizzazione ha rappresentato un elemento chiave per trasformare una filiera descritta in modo frammentario (quantomeno in origine), in una struttura ordinata ed interrogabile.

La tesi evidenzia inoltre come il passaggio dalla scala di laboratorio (0,100 kg di black mass) alla scala industriale non è solo una ripetizione dello stesso processo in grande, ma comporta dei cambiamenti nella gestione operativa, come ad esempio il riutilizzo delle soluzioni e dell'acqua, in generale, diventano più praticabili alcuni processi, e si manifesta con chiarezza l'effetto delle economie di scala, che incide sia sui costi che sulla riduzione degli sprechi [45] [47]. Allo stesso tempo, aumentando il volume dell'input in ingresso, è necessario controllare la variabilità dello stesso, in modo tale che la complessità non venga poi traslata sui prodotti finali.

Nel complesso possiamo leggere il contributo della tesi su due piani: sul piano metodologico, mostriamo come la formalizzazione MEIO sia un metodo altamente valido per la formalizzazione di processi molto eterogenei, di processi distribuiti, che aiuta ad avere una rappresentazione della filiera chiara, utile per analisi successive ed eventualmente, decisioni strategiche. Sul piano operativo invece, i risultati ci mostrano quelli che sono i processi più critici e aiutano quindi ad indirizzare l'attenzione verso i punti che più influenzano l'efficienza della filiera.

Accanto ai risultati ottenuti è necessario discutere quelli che sono stati i principali limiti di questa tesi e che hanno caratterizzato questo lavoro: da un lato abbiamo la natura dei dati e il livello di maturità di questi. In secondo luogo, un'altra difficoltà ha riguardato le eterogeneità delle fonti: una parte dei dati utilizzati provengono da attività di laboratorio e quindi, come abbiamo detto anche nei capitoli precedenti, sono riconducibili a delle misurazioni replicabili (con le dovute accortezze), altri dati invece sono stati ricostruiti dalla letteratura e quindi sono stati inevitabilmente soggetti ad assunzioni [69].

Questo discorso vale in particolar modo per tutti gli aspetti legati alla composizione della black mass, che, come ormai ben noto, è il punto focale di tutta la trattazione, ed in generale rimane il punto focale della filiera; non essendo stata prodotta all'interno del laboratorio ha fatto sì che nella filiera entrasse in gioco una variabilità non trascurabile, tale condizione ha quindi introdotto un elemento di incertezza compositiva e qualitativa che non è possibile controllare nel perimetro di questa tesi, né tanto meno è stata possibile controllare in laboratorio [69]. Per concludere quindi possiamo dire che la filiera risulta supportata da un mix di fonti: potremmo chiamare dati *forti*, e quindi *certi*, i dati sperimentali che sono stati quelli di laboratorio, e dati *deboli*, tutti i dati assunti dalla letteratura.

Un altro limite riguarda la scalabilità: la trattazione di questa tesi ha mostrato come risultato che tramite potenziali benefici legati alle economie di scala, all'integrazione e al recupero di flussi interni ed esterni, ed in generale al modo in cui sono stati strutturati i flussi per il recupero, un processo di industrializzazione è più che plausibile. Tuttavia, la tesi non consente di quantificare in modo robusto quale sia la performance reale del processo all'aumentare della scala, né di stimare l'entità di queste economie di scala ipotizzate. Tutte le assunzioni fatte in precedenza restano quindi ipotesi ragionevoli, ma non sono state ancora valutate sperimentalmente in un contesto industriale e reale.

Questo limite diventa ancora più rilevante se si considera lo stesso scenario di sistema che abbiamo messo in piedi nel capitolo 6 quando è stato ipotizzato un unico impianto in grado di trattare l'intero flusso di batterie a livello nazionale; senza entrare nel merito di scelte logistiche, possiamo certamente dire che l'analisi non permette di stabilire la configurazione impiantistica ottimale e né la scala giusta per massimizzare l'efficienza tecnica che comunque rimane un punto importante della trattazione. Pertanto, i risultati raccolti al di fuori della scala di laboratorio devono essere considerati come una direzione di lavoro e non assolutamente come una conclusione definitiva.

Nonostante tutti i limiti appena elencati, la tesi comunque fornisce delle indicazioni utili per intraprendere un percorso in questa direzione; in particolare per quanto riguarda il recupero del litio si evidenziano margini concreti di miglioramento, tra questi: l'aumento dell'efficienza di recupero, il perfezionamento delle strategie di recupero e un miglioramento della tracciabilità complessiva dei flussi. In tale direzione gli strumenti come il passaporto digitale e in generale pratiche di gestione dei dati più strutturate possono contribuire a ridurre la variabilità sull'input e rendere il processo più controllabile, soprattutto in prospettiva di un'industrializzazione [11] [62].

In questo scenario, un primo filone d'indagine riguarda proprio il cambio di scala controllato del processo: si è partiti dalla descrizione dei processi di laboratorio in cui si è lavorato su 0,1 kg di black mass, per poi approdare direttamente a un input di 10.000 kg di batterie in ingresso. Per valutare la robustezza dei risultati è necessario uno cambio di scala controllato: è necessario pensare ad un percorso di crescita progressiva, andando quindi ad aumentare la quantità di black mass in maniera graduale: passando da 0,1 kg a 1 kg, poi andando verso i 10 kg, e così via; solo con questa modalità saremo in grado di identificare in maniera più affidabile, tempi

di trattamento e criticità operative, evitando di attribuire impropriamente all'effetto scala fenomeni che potrebbero dipendere da variabili non controllate.

In parallelo, la variabilità della black mass come ben noto non è un input uniforme, può variare in funzione delle chimiche di partenza (le celle NCM, LCF, miste, hanno notoriamente delle chimiche differenti), dei pretrattamenti, del mix di batterie raccolte, etc. È necessario quindi strutturare attività di caratterizzazione e confronto fra i lotti, così da poter spostare l'analisi da un caso campione a condizioni di esercizio realistiche, per definire procedure di controllo qualità e accettazione del materiale in ingresso [69].

Un terzo ambito di ricerca riguarda il recupero e il reimpiego di acqua e delle soluzioni di processo. L'ipotesi di riutilizzare questi flussi è più che coerente con l'obiettivo della tesi, ma richiede comunque delle verifiche sugli effetti che potrebbe produrre nel tempo: in particolare, occorre valutare in che misura questo ricircolo influenzi le rese di recupero, se c'è accumulo di contaminanti o la formazione di impurità. In questo senso possiamo suggerire per la ricerca futura di implementare un sistema in cui ci sia effettivamente il ricircolo delle soluzioni e dell'acqua, monitorando i risultati, e definendo, se necessario, delle soglie oltre le quali non è più possibile continuare con il riciclo ed implementando quindi delle strategie di rigenerazione [45].

Un ulteriore sviluppo riguarda l'integrazione tra le fasi della filiera e l'estensione dell'analisi degli output. Sarebbe utile approfondire il ruolo dei pretrattamenti e quanto influenzano la composizione della black mass, ed inoltre, sarebbe utile anche approfondire strategie di recupero per tutte le correnti che non sono state approfondite, e per quali i materiali non sono stati analizzati in modo completo. L'integrazione tra le fasi della filiera non deve essere intesa solo come ottimizzazione interna, ma potrebbe essere anche un'occasione di connessione con filiere complementari, laddove vi sia la possibilità di far nascere delle sinergie tecniche ed economiche.

In tale prospettiva, nella tesi è già stata proposta l'integrazione con soluzioni che riducono l'impatto energetico complessivo, l'integrazione con la filiera del biocarbonio / biochar, che supporta una visione più ampia della catena., pur non essendo rientrata la produzione di nuove celle tra le attività sperimentali del progetto [55] [60].

In ultimo, un'altra direzione di sviluppo percorribile riguarda la formalizzazione stessa, qualora si proceda verso uno scale up controllato, e diventino disponibili dati più solidi rispetto ai

consumi, rese, bilanci, sarebbe possibile concludere il cerchio della formalizzazione MEIO aggiungendo anche i flussi energetici, i quali (attraverso la tabella e grafici dedicati), permetterebbero di passare ad un modello più adatto a valutazioni quantitative, le quali a loro volta potrebbero essere utili per prendere decisioni su investimenti futuri, e su la priorità di questi [45].

Il lavoro fornisce contributi su più livelli:

- Evidenzia l'utilità della formalizzazione MEIO come metodo per trasformare una filiera complessa in una trattazione strutturata, rendendo esplicite le relazioni tra i vari flussi e passaggi della filiera [45];
- Migliora la tracciabilità e la trasparenza, distinguendo i passaggi sviluppati in laboratorio da quelli tratti dalla letteratura [69];
- Formalizza l'identificazione delle criticità di filiera: variabilità dell'input, consumi, qualità dei materiali e delle correnti recuperate [46];
- Costituisce un ponte verso lo sviluppo della scala industriale, chiarendo dove è ragionevole attendere dei buoni risultati grazie alle economie di scala, ed invece dove è necessario condurre degli esperimenti pilota per validare le ipotesi fatte [47];
- Infine, sottolinea che la robustezza del recupero non dipende solo da come questo viene fatto a livello di processo chimico, ma la robustezza dipende fortemente anche dalla disponibilità dei dati, dalla possibilità di standardizzare i flussi e dagli strumenti di tracciabilità [62].

In conclusione, la tesi mostra che l'unione di un caso di studio reale, applicativo, e una formalizzazione strutturata della conoscenza (formalizzazione MEIO), consente di passare da una descrizione qualitativa del riciclo ad un quadro analitico chiaro e oggettivo utile per il confronto, discussioni e scelte di filiera.

Come già ampiamente ripetuto, la formalizzazione rende trasparenti tutte le fasi del progetto: input output, assunzioni, etc. Nel contesto della transizione energetica, questo tipo di approccio, basato sulla trasparenza e sulla chiarezza delle fasi, rappresenta un contributo alla costruzione di filiere più controllabili, e di conseguenza più efficienti, orientate alla riduzione degli sprechi, offrendo una base metodologica operativa per rafforzare le ipotesi di fattibilità di un recupero sempre più autonomo e sostenibile dei metalli critici delle batterie a fine vita.

9. Bibliografia e sitografia

- [1] Baldé, C. P.; Kuehr, R.; Yamamoto, T.; McDonald, R.; D'Angelo, E.; Althaf, S.; Bel, G.; Deubzer, O.; Fernandez-Cubillo, E.; Forti, V.; Gray, V.; Herat, S.; Honda, S.; Iattoni, G.; Khetriwal, D. S.; Luda di Cortemiglia, V.; Lobuntsova, Y.; Nnorom, I.; Pralat, N.; Wagner, M. (2024). *Global E-waste Monitor 2024*. Geneva/Bonn: International Telecommunication Union (ITU) & United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). 148 p. ISBN (PDF) 978-92-61-38781-5.
- [2] Abnett, K. (2024, 23 April). "EU parliament approves rules requiring companies to repair worn-out products." *Reuters* (dateline: Brussels).
- [3] European Environment Agency (EEA). (2024). *Electric vehicles* (In-depth topic page).
- [4] International Energy Agency (IEA). (2025). *Global EV Outlook 2025*. Paris: International Energy Agency.
- [5] Environmental Protection Agency (EPA) Ireland. (2023). *Guidance on the Safe Storage of Lithium-Ion Batteries at Waste Handling Facilities*. Johnstown Castle Estate, County Wexford (IE): Environmental Protection Agency. 54 p. ISBN 978-1-80009-149-8.
- [6] UK Department for Transport. (2026). *Transporting small mixed waste electrical equipment* (Guidance, GOV.UK).
- [7] Council of the European Union. (2025). *Critical raw materials* (infografica).
- [8] European Commission — Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (DG GROW). (s.d.). *Critical raw materials* (pagina web).
- [9] United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). (2024). *Global e-Waste Monitor 2024: Electronic Waste Rising Five Times Faster than Documented E-waste Recycling* (press release). Geneva/Bonn: UNITAR.
- [10] Andreasi Bassi, S.; Peters, J. F.; Candelaresi, D.; Valente, A.; Ferrara, N.; Mathieux, F.; Ardente, F. (2023). *Rules for the calculation of the Carbon Footprint of Electric Vehicle*

Batteries (CFB-EV). Final draft (Science for Policy report). Luxembourg: Publications Office of the European Union. 74 p.

[11] European Union. (2023). Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries (Text with EEA relevance). Official Journal of the European Union, L 191, 28 July 2023, pp. 1–117.

[12] European Commission; Joint Research Centre (JRC). (2023). Battery technology in the European Union: Status report on technology development, trends, value chains & markets 2023 (EUR 31698 EN). Publications Office of the European Union (Luxembourg). ISBN 978-92-68-08427-4; ISSN 1831-9424.

[13] MICS – Made in Italy Circolare e Sostenibile. (s.d.). New approaches to recovery critical metals from spent lithium-ions batteries – AMELIE (pagina progetto).

[14] MICS – Made in Italy Circolare e Sostenibile. (s.d.). New approaches to recovery critical metals from spent lithium-ions batteries – AMELIE (project page, versione EN).

[15] Italtel. (s.d.). Il progetto AMELIE su TGR Leonardo: Italtel per batterie più sostenibili.

[16] International Organization for Standardization (ISO). (2006). ISO 14040:2006 — Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (2nd ed.). ISO (Geneva, Switzerland).

[17] Zanoletti, A., Carena, E., Ferrara, C., & Bontempi, E. (2024). A review of lithium-ion battery recycling: Technologies, sustainability, and open issues. *Batteries*, 10(1), Article 38 (30 pp.).

[18] Tas, G., Klemettinen, A., & Serna-Guerrero, R. (2024). Circular and sustainable: Evaluating lithium-ion battery recycling using a combined statistical entropy and life cycle assessment methodology. *ChemSusChem*, 17(18), Article e202400376.

[19] Velázquez-Martínez, O., Valio, J., Santasalo-Aarnio, A., Reuter, M., & Serna-Guerrero, R. (2019). A critical review of lithium-ion battery recycling processes from a circular economy perspective. *Batteries*, 5(4), Article 68 (33 pp.).

[20] Das, P., Hewage, K., Kotagodahetti, R., Wanniarachchi, S., & Sadiq, R. (2026). Lithium-ion battery recycling: A critical review of techno-economical and socio-environmental

impacts. *Separation and Purification Technology*, 382(Part 2), Article 135847 (26 February 2026).

[21] Man, G. T., Iordache, A. M., Zgavarogea, R., & Nechita, C. (2024). *Recycling Lithium-Ion Batteries—Technologies, Environmental, Human Health, and Economic Issues—Mini-Systematic Literature Review*. *Membranes*, 14(12), Art. 277, 1-21.

[22] European Commission, Directorate-General for Environment. (2025, July 4). *Circular Economy: New rules to boost recycling efficiency and material recovery from waste batteries* (news article).

[23] Revive Batteries. (2025, November 26). *Battery recycling efficiency in the EU: the 31 December 2025 deadline is coming* (articolo web).

[24] European Union – Directorate-General for Communication. (s.d.). Types of EU legislation. Pagina informativa.

[25] Motus-E. (2024, April). *The implications for Italy of the new EU battery regulation: Scope and Purpose* (report). 60 pp.

[26] Rezaei, M., Nekahi, A., Kumar, M. R., Nizami, A., Li, X., Deng, S., Nanda, J., & Zaghib, K. (2025). A review of lithium-ion battery recycling for enabling a circular economy. *Journal of Power Sources*, 630, 236157.

[27] Stena Recycling. (s.d.). EU Battery Regulation make new demands on industry (Guide/Article, News & Insights).

[28] Battery University. (2024, January 15). BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries (articolo web).

[29] Lighting Global. (2019, June). *Lithium-ion Batteries Part I: General overview and 2019 update*. Technical Notes, Issue #30. 11 pp.

[30] Fazal, S., Ahmad, F., Khan, M. I., Shanableh, A., & Manzoor, S. (2024). A comprehensive review on the challenges associated with lithium-ion batteries and their possible solutions. *New Journal of Chemistry*, 48, 14104–14127.

[31] Tembo, P. M., Dyer, C., & Subramanian, V. (2024). Lithium-ion battery recycling—a review of the material supply and policy infrastructure. *NPG Asia Materials*, 16, Articolo 43, pp. 1–20.

- [32] Pagnanelli, F., Schiavi, P. G., Altimari, P., Beolchini, F., Amato, A., Coletta, J., Forte, F., Moscardini, E., & Toro, L. (2023). Economic and environmental sustainability of an innovative cryo-mechano-hydrometallurgical process validated at pilot scale for the recycling of Li batteries. *Metals*, 13(3), Articolo 497, pp. 1–15.
- [33] Glencore. (2023, May 9). Glencore and Li-Cycle announce joint study to develop a European recycling hub. Comunicato stampa.
- [34] Centro di Coordinamento Nazionale Pile e Accumulatori (CDCNPA). (s.d.). Il CDCNPA (pagina istituzionale).
- [35] Zanardo, E. (2025, July 3). Cresce il tasso di recupero delle batterie industriali. Qualche dato. *TCE Magazine*.
- [36] Centro di Coordinamento Nazionale Pile e Accumulatori (CDCNPA). (2022). 9° Rapporto annuale 2022. Rapporto. 30 pp.
- [37] Centro di Coordinamento Nazionale Pile e Accumulatori (CDCNPA). (2023). 10° Rapporto annuale 2023. Rapporto. 28 pp.
- [38] Centro di Coordinamento Nazionale Pile e Accumulatori (CDCNPA). (s.d.). 9° Rapporto annuale, aumentano la raccolta e i punti di prelievo (news).
- [39] Redazione. (2024, June 25). Nel 2023 in Italia è cresciuto il tasso di raccolta di pile e accumulatori portatili. *Eco dalle Città*.
- [40] Centro di Coordinamento Nazionale Pile e Accumulatori (CDCNPA). (2023). CDCNPA Report 2023. Rapporto. 28 pp.
- [41] Centro di Coordinamento Nazionale Pile e Accumulatori (CDCNPA). (2025). 11° Rapporto annuale 2024. Edizione del 17 giugno 2025.
- [42] Recycling Industry. (2025, 16 maggio). Sale il tasso di raccolta dei rifiuti di batterie portatili.
- [43] Centro di Coordinamento Nazionale Pile e Accumulatori (CDCNPA). (s.d.). Rapporti annuali (pagina istituzionale).

- [44] MICS – Made in Italy Circolare e Sostenibile. (s.d.). AMELIE – 5.01 New approaches to recovery critical metals from spent lithium-ions batteries (pagina progetto; periodo progetto: gennaio 2023 – dicembre 2025).
- [45] Castiglione, C., Pastore, E., & Alfieri, A. (2024). Technical, economic, and environmental performance assessment of manufacturing systems: The multi-layer enterprise input-output formalization method. *Production Planning & Control*, 35(2), 133–150.
- [46] Castiglione, C., Pastore, E., & Alfieri, A. (2024). Multi-dimensional and multi-level assessment of circular economy strategies in manufacturing systems. *Procedia CIRP*, 122, 19–24.
- [47] Castiglione, C., & Fiore, E. (2022). Sustainable production networks: A design methodology based on the cooperation among stakeholders. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132308.
- [48] Argante E., (2025, 30 aprile). Riciclare il litio per salvare il pianeta: così il progetto Amelie vuole rivoluzionare l’energia circolare. *Forbes Italia*.
- [49] Martello, N. (2025, 11 maggio). Progetto Amelie: recuperare i materiali delle batterie. *Rinnovabili & Risparmio*.
- [50] Redazione InnovationCity. (2025, 7 maggio). Amelie, progetto tutto italiano per riciclare le batterie agli ioni di litio. *InnovationCity*.
- [51] Università degli Studi di Brescia. (2024, 29 ottobre). Thermal approaches based on microwaves to recover lithium from exhausted batteries. Sezione “Communication – All news”, Università degli Studi di Brescia.
- [52] MICS – Made in Italy Circolare e Sostenibile. (s.d.). Spoke 5: Closed-loop, sustainable and inclusive factories and processes. *MICS – Made in Italy Circolare e Sostenibile*.
- [53] Italtel. (s.d.). Il progetto AMELIE su TGR Leonardo: Italtel per batterie più sostenibili. Sezione “Research”, Italtel.
- [54] MICS - Made in Italy Circolare e Sostenibile (2025). Presentazione MICS – Made in Italy Circolare e Sostenibile [documento PDF]. *MICS - Made in Italy Circolare e Sostenibile*. 4 pp.
- [55] Bazri, S., Mapelli, C., Mapelli, L. G., Mombelli, D., Tommasini, M. M. S., & Lucotti, A. (2025). Thermo-catalytic methane pyrolysis for sustainable carbon production in steelmaking

applications: Stainless steel catalysis and CO₂-enhanced catalyst regeneration. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 192 (novembre), Articolo 107334.

[56] Haiki+ S.p.A., & Cobat Ecofactory; Università dell'Aquila; Smart Waste Engineering. (2025, 17 settembre). Haiki+ e Cobat Ecofactory guidano l'Italia nel riciclo delle batterie. Dal MASE 1,2 milioni al primo hub nazionale (Progetto BATMAN – Battery Treatment and Management) [Comunicato stampa congiunto]. Milano. 3 pp.

[57] Petrone, A. (2025, 18 settembre). In Abruzzo arriva BATMAN, primo hub industriale nazionale per il riciclo delle batterie. *Rinnovabili.it*.

[58] Ernst & Young Global Limited (EY). (2021, 23 giugno). Electric vehicles to dominate sales five years sooner than expected: EY analysis [Comunicato stampa/Newsroom].

[59] International Energy Agency (IEA). (2025). *Global EV Outlook 2025: Expanding sales in diverse markets (Revised version, July 2025)*. Paris: International Energy Agency. 173 pp.

[60] Dall'Osto, G., Mombelli, D., Scolari, S., & Mapelli, C. (2025). Modeling of the biogenic carbon composite agglomerates degree of reduction for effective biochar valorization and utilization. In *Proceedings of the 12th International Conference on Sustainable Solid Waste Management (CYPRUS2025)*, Paphos, Cyprus, 25–28 June 2025.

[61] Motus-E; PwC Strategy&; Politecnico di Milano. (2023, marzo). *Il riciclo delle batterie dei veicoli elettrici @2050: scenari evolutivi e tecnologie abilitanti*. Report, 74 p.

[62] Rizos, V., & Urban, P. (2024, marzo). *Implementing the EU Digital Battery Passport: Opportunities and challenges for battery circularity*. CEPS In-Depth Analysis, No. 2024-05, 29 p. Centre for European Policy Studies (CEPS), Brussels.

[63] Seroka, N. S., Luo, H., & Khotseng, L. (2024). Biochar-Derived Anode Materials for Lithium-Ion Batteries: A Review. *Batteries*, 10(5), Articolo 144. MDPI.

[64] Barbosa Nogueira, M. J., Chauque, S., Sperati, V., Savio, L., Divitini, G., Pasquale, L., Marras, S., Franchi, P., Paciornik, S., Proietti Zaccaria, R., & Ginoble Pandoli, O. (2025). Untreated bamboo biochar as anode material for sustainable lithium ion batteries. *Biomass and Bioenergy*, 193, Articolo 107511.

[65] Marie, J.-J., & Gifford, S. (2023, settembre). *Developments in Lithium-Ion Battery Cathodes*. Faraday Insights, Issue 18, 12 p. The Faraday Institution.

[66] Archimede Energia. (2025, 9 maggio). Batterie stazionarie: cosa sono, normative e differenze con le semi-stazionarie. Articolo web.

[67] Mousa, E., Hu, X., Ånnhagen, L., Ye, G., Cornelio, A., Fahimi, A., Bontempi, E., Frontera, P., Badenhorst, C., Santos, A. C., Moreira, K., Guedes, A., & Valentim, B. (2023). Characterization and Thermal Treatment of the Black Mass from Spent Lithium-Ion Batteries. *Sustainability*, 15(1), Articolo 15. MDPI.

[68] Davies, S. H., Christensen, P., Holberg, T., Avelar, J., & Heidrich, O. (2024). Raw Materials and Recycling of Lithium-Ion Batteries. In S. Passerini, L. Barelli, M. Baumann, J. Peters, & M. Weil (Eds.), *Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition: Cost, Sustainability, and Performance Analysis* (1st ed., The Materials Research Society Series, pp. 143–169). Springer, Cham.

[69] Progetto AMELIE. (2025). Report tecnico interno sui bilanci di massa (Dati non pubblicati). Politecnico di Torino.