

URBAN MINING DI MATERIE PRIME E CRM DALLE BATTERIE DEI VEICOLI ELETTRICI PER LA REALIZZAZIONE DI UNA FILIERA CIRCOLARE IN ITALIA

Cristian Chiavetta ¹, Marco La Monica ¹, Pier Luigi Porta ¹, Claudia Scagliarino ² e Laura Cutaia ¹

¹ ENEA. Laboratorio di Valorizzazione delle risorse (RISE), Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali (SSPT), Italia

² CINIGeo - Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Ingegneria delle Georisorse, Corso Vittorio Emanuele II, 244 - 00186 Roma (RM), Italia

ABSTRACT: Il presente lavoro analizza la filiera delle batterie di veicoli elettrici, proponendosi come strumento di supporto per la valutazione della fattibilità della creazione di un'industria del riciclo delle batterie in Italia. Lo studio parte da un'analisi quantitativa dei materiali catodici della batteria, di particolare interesse sia per la presenza di materie prime critiche (CMR) che di materiali con filiere complesse, per passare ad un'analisi previsionale dei flussi di materiale futuro, basandosi su tre scenari di penetrazione delle auto elettriche in Italia. Nello studio si analizza, inoltre, l'intero ciclo di vita delle batterie, prevedendo la possibilità di un secondo utilizzo delle batterie in sistemi di accumulo prima che i materiali entrino negli impianti di riciclaggio. Lo studio sull'intera catena del valore delle batterie di trazione ha seguito un'ottica di economia circolare e uso efficiente delle risorse, ponendosi come elemento di supporto alle decisioni per la valutazione dell'opportunità della creazione di una filiera di trattamento delle batterie elettriche di trazione veicolare in Italia, considerato il loro elevato valore residuo a fine vita, che può costituire un considerevole giacimento di materie prime seconde.

Keywords: Batterie elettriche di trazione, Economia Circolare, Material flow analysis, CRM, Filiera del riciclo

1. INTRODUZIONE

Capire al momento quale sarà il destino delle batterie elettriche di trazione al termine della loro vita utile è complesso, date le molte opzioni disponibili e lo sviluppo tecnologico rapido delle batterie a ioni di litio, che variano per materiali, dimensioni, forma e quantità degli elementi catodici. La gerarchia delle opzioni include il riutilizzo nell'applicazione originale, l'uso a cascata in altre applicazioni (energy storage), la rigenerazione o ristrutturazione, il riciclaggio e, infine, lo smaltimento. La Direttiva 2006/66/CE del Parlamento europeo (Allegato III) stabilisce che almeno il 50% in peso di materiali delle batterie debba essere riciclato. La direttiva permette di mandare fuori dai confini nazionali le batterie da riciclare, purché siano rispettate certe norme di sicurezza l'esportazione può avvenire anche in Paesi al di fuori della Comunità europea. In Italia in effetti la prassi seguita è quella dell'esportazione, abbiamo infatti numerosi centri di raccolta con buone percentuali di recupero delle batterie usate ma non ci sono impianti di riciclaggio. Finora le batterie a ioni di litio, nonostante siano state sviluppate procedure di riciclaggio dei materiali strategici di cui sono costituite, non sono generalmente applicate e le batterie vengono smaltite senza essere riciclate. Questo perché il prezzo attuale sul mercato dei materiali non è

sufficientemente elevato da rendere conveniente il riciclo, a differenza di quanto avviene per altre tecnologie. Un altro aspetto da considerare, è che la vita attesa di una batteria a ioni di litio per EV è superiore a quella nell'utilizzo in un veicolo (spesso pari all'80% della capacità). Si potrebbero sviluppare quindi procedure per il suo riutilizzo in altre applicazioni (ossia una seconda vita a cascata in altre applicazioni), in particolare in applicazioni a supporto del sistema elettrico come l'alimentazione stazionaria e il livellamento del carico di rete. Molte case automobiliste, tra cui BMW, Nissan, Renault ed altre, hanno proposto, almeno finché gli impianti di trattamento non siano a regime, di utilizzare le batterie per l'energy storage, cioè un riutilizzo come stoccaggio della rete, allungando la vita delle batterie potenzialmente per un altro decennio. I sistemi di stoccaggio a griglia utilizzano batterie che non funzionano più per alimentare le auto elettriche, ma che possedendo ancora tra il 70 e l'80% della capacità di alimentazione originaria, possono essere riutilizzate in modo efficiente per questo servizio. Joe Romm su ThinkReport sottolinea che la possibilità di riutilizzare le batterie delle auto elettriche in effetti potrebbe avere due grandi vantaggi: primo, queste batterie usate possono offrire uno stoccaggio di elettricità più economico per le rinnovabili rispetto a quello oggi disponibile. Secondo, se le batterie usate hanno un valore, allora i produttori possono caricare meno il costo per le loro auto, perché possono fare la differenza rivendendo la batteria in seguito, rendendole ancora più convenienti. Si potrebbe aggiungere a queste due considerazioni anche la riduzione dell'impatto ambientale complessivo di questi prodotti. L'analisi di Creation Inn, una società di consulenza specializzata in energy storage e in economia circolare, prevede che almeno il 60% delle batterie dei veicoli elettrici servirà in soluzioni di secondo utilizzo prima che vengano inviate al riciclaggio. Probabilmente il dato è sovrastimato, infatti le nuove linee guida sia in Europa che in Cina assicurano che almeno il 50% delle batterie esauste vengano avviate al riciclaggio, ma è anche vero che molte case automobilistiche stanno prendendo accordi perché una buona parte delle batterie vengano, almeno nei primi periodi, mandati al riutilizzo per l'accumulo. La Nissan Leaf, ad esempio, ha preso accordi affinché le batterie a fine vita vadano a fare da tampone per le luci della Amsterdam arena. Come abbiamo appunto detto precedentemente, alla fine dell'utilizzo della batteria in un'auto elettrica la sua capacità residua la rende disponibile per una seconda vita, con un uso differente dalla prima ma che può allungare la sua attività per altri 5/10 anni, a seconda della destinazione. Arrivata nuovamente al fine vita si troverà come unica strada percorribile quella del riciclo. A livello globale le percentuali di batterie a ioni di litio esauste riciclate al momento sono intorno al 5%, ma in diversi Paesi si stanno muovendo sia a livello legislativo che finanziario per la costruzione di impianti che possano gestire i flussi previsti per i prossimi anni. In particolare in Cina all'inizio del 2018 sono state condotte molte ricerche sul riciclaggio, che coprono una vasta gamma di tecnologie tra cui il pre-trattamento come lo smontaggio, la triturazione e le operazioni di segregazione, nonché tecnologie di recupero come pirometallurgia, idrometallurgia, estrazione con solvente ed elettro-raffinazione. Anche le infrastrutture industriali sono progredite, con alcune aziende che riciclano le batterie a ioni di litio su scala commerciale. In alcuni casi, tuttavia, il litio non viene recuperato o viene recuperato con impurità che lo rendono non adatto per il riutilizzo nella produzione di batterie. Gli studi hanno rilevato risparmi di risorse derivanti dal riciclo e la potenziale significativa riduzione dell'impatto ambientale.

Lo studio di seguito presentato è stato condotto nel contesto della collaborazione tra ENEA e la Ricerca di Sistema Elettrico al fine di effettuare una valutazione quantitativa delle materie prime contenute nel catodo delle batterie di trazione per autoveicoli elettrici (Litio, Manganese, Cobalto e Nichel) che alla fine della loro vita utile potrebbero rappresentare una preziosa fonte di materie prime seconde per la fabbricazione di nuove batterie o per venire sfruttate in altri ambiti produttivi. Nello studio sono state fatte anche considerazioni di carattere economico al fine di fornire una stima di massima della fattibilità del sistema di riciclaggio ipotizzato.

Il modello realizzato restituisce innanzitutto i quantitativi delle materie prime potenzialmente ottenibili dal riciclaggio delle batterie elettriche di trazione immesse nel parco mezzi privato italiano nel periodo 2010-2030. L'analisi offre in output dei valori di materie prime riciclate economicamente sfruttabili sul

mercato delle materie prime seconde, sulla base di alcune ipotesi volte a tenere in considerazione l'efficienza dei sistemi di riciclaggio per le diverse materie prime oggetto di studio e l'andamento delle percentuali di riutilizzo in ambito storage delle batterie nell'orizzonte temporale considerato. Per definire i quantitativi di batterie immesse sul mercato nel periodo considerato (da cui calcolare i suddetti valori annuali di output del modello), l'analisi prende a riferimento per la definizione degli scenari di penetrazione della mobilità elettrica nel parco auto italiano, lo studio strategico "e-Mobility Revolution. Gli impatti sulle filiere industriali italiane e sul Sistema-Paese: quale Agenda per l'Italia" realizzato da The European House – Ambrosetti per conto di Enel.

Il modello previsionale sui flussi in uscita a fine vita delle batterie è funzione dunque di tre scenari di penetrazione proposti dallo studio della Ambrosetti, dei diversi modelli di batterie che verranno presi come riferimento tecnologico in tre differenti periodi dell'orizzonte temporale considerato e di altri parametri descritti dettagliatamente nella sezione dedicata alle ipotesi dello studio che intendono considerare la vita utile delle batterie nel loro ciclo di vita primario nell'ambito della trazione veicolare e del loro riutilizzo come sistemi di accumulo (entrambe ipotizzate pari ad 8 anni). Oltre a ciò sono stati introdotti parametri indicizzati annualmente che tengano conto dei quantitativi di batterie recuperabili e dell'efficienza di recupero dei sistemi di riciclaggio dei minerali in esse contenuti.

Lo studio evidenzia come lo sviluppo di un efficiente sistema di raccolta e riciclaggio delle batterie esauste potrebbe rappresentare un'opportunità per la creazione di un mercato nazionale di tali materie prime. Evitare l'esportazione delle batterie a fine vita a favore di un operatore che le ricicli al di fuori del territorio nazionale (principalmente Cina), mantenendo invece, tramite una specifica industria del riciclaggio, parte della catena del loro valore in Italia, permetterebbe peraltro la creazione di occupazione ed una generale riduzione degli impatti generati dai trasporti lungo il ciclo di vita delle batterie. In conclusione, le evidenze legate all'analisi di scenario dello studio si propongono come strumento di supporto per la valutazione della fattibilità della creazione di un'industria del riciclo delle batterie, nell'ambito di una più ampia strategia nazionale per la raccolta, il trattamento ed il recupero delle stesse. Il set di informazioni riportato in questo report può essere dunque considerato utile materiale di supporto nella definizione di una strategia nazionale per lo sfruttamento dell'elevato valore residuo delle batterie di trazione a fine vita, in un'ottica di implementazione dell'economia circolare e dell'uso efficiente delle risorse.

2. L'APPROCCIO METODOLOGICO, GLI OBIETTIVI E LE IPOTESI DELLO STUDIO

Lo studio ha come obiettivo principale la quantificazione (dal 2019 al 2038) dei flussi di materie prime contenute nel catodo delle batterie elettriche di trazione (Litio, Manganese, Cobalto, Nichel) potenzialmente recuperabili annualmente tramite processi di riciclaggio. I materiali della batteria potenzialmente riciclabili sono infatti quasi esclusivamente quelli catodici, ovvero quelli che a livello economico hanno un più alto valore. Non ci sono informazioni sul riciclo dell'anodo, in quanto ad oggi i processi di trattamento distruggono la grafite. Solo attraverso processi meccanici si riesce ad ottenere che l'anodo non perda i suoi componenti, ma non si sono trovati dati su come venga trattato e che tipo di riutilizzo si faccia della grafite. L'unico recupero di grafite flakes di alta qualità potrebbe avvenire nella produzione di acciaio Kish, tecnicamente è possibile, ma non praticato al momento. I materiali recuperati sono principalmente quelli trattati in questo documento. I flussi di materie prime seconde sono stati calcolati prendendo come riferimento tre differenti scenari di penetrazione della mobilità elettrica (un *worst case* scenario definito identificato come *inerziale*, un *best case* scenario identificato come *accelerato* ed uno scenario *medio*, intermedio tra i due) ottenuti tramite interpolazione dei dati di penetrazione al 2030 della mobilità elettrica nel parco auto italiano, proposti dallo studio e-Mobility Revolution della European House – Ambrosetti (di cui si darà maggiore dettaglio nel paragrafo che segue del presente documento). A tali dati di immatricolazione calcolati con cadenza annuale dal 2010

al 2030 sono stati combinati anche dati specifici riguardanti la tipologia di batteria attualmente utilizzata (NMO, Nichel-Ossido di Manganese) dal veicolo di riferimento dell'analisi (Nissan LEAF), oltre alla tecnologia che verrà implementata nell'immediato futuro (batteria NMC 622, dall'anno 2019) e quella a cui si è ipotizzato che la Nissan possa ricorrere per le auto prodotte nel quinquennio 2025-2030 (NMC 811). Per un dettaglio delle ipotesi alla base della scelta della Nissan Leaf come veicolo di riferimento per la modellizzazione del parco auto italiano si rimanda al report che si riferisce alle attività dell'annualità 2017 del presente progetto. La combinazione, dunque, dei suddetti dati di immatricolazione e di quelli rappresentativi della tecnologia di accumulo utilizzata per le batterie di trazione hanno costituito i dati di input del modello per la quantificazione dello stock di materie prime catodiche (Litio, Nichel, Manganese e Cobalto) presenti nelle batterie del parco auto italiano nel periodo 2010-2030. Tali valori calcolati annualmente sono poi stati utilizzati per definire i flussi di rilascio di materie prime seconde a valle dei processi di raccolta delle batterie e di riciclaggio delle stesse. I quantitativi di Litio, Nichel, Manganese e Cobalto disponibili di anno in anno secondo il modello sono funzione, oltre che dei dati di input appena descritti, anche dell'efficienza di recupero delle tecnologie di riciclaggio utilizzate e della capacità di raccolta e invio a recupero delle batterie stesse. Tali dati definiti anno per anno nel modello e le ipotesi alla base delle scelte dei valori utilizzati sono più dettagliatamente descritti nei paragrafi che seguono.

Per definire i quantitativi di materie prime da rendere disponibili al mercato delle materie prime seconde tramite riciclaggio delle batterie elettriche di trazione, il modello definito nello studio utilizza, tra i vari dati di input, il numero di mezzi elettrici immatricolati anno per anno dal 2010 al 2030. Tali dati sono stati calcolati tramite interpolazione di stime realizzate dalla European House – Ambrosetti nel 2017. Più nel dettaglio l'analisi descritta in questo report prende a riferimento per la definizione degli scenari di penetrazione della mobilità elettrica nel parco auto italiano, lo studio strategico *"e-Mobility Revolution"*. *Gli impatti sulle filiere industriali italiane e sul Sistema-Paese: quale Agenda per l'Italia"* realizzato appunto dalla The European House – Ambrosetti per conto di Enel (settembre 2017). Di seguito si darà descrizione delle ipotesi tramite cui la European House – Ambrosetti ha realizzato le proprie stime al fine di definire in maniera chiara le ipotesi tramite cui è stata realizzata la definizione dei valori annuali di immatricolazione di mezzi elettrici per i tre scenari considerati nel nostro studio. Per realizzare le proprie stime la Ambrosetti ha definito scenari che considerano esclusivamente il comparto degli autoveicoli con l'esclusione, quindi, dei segmenti relativi agli altri mezzi di trasporto a quattro o due ruote (veicoli commerciali, autobus e motocicli).

Gli scenari delineati si riferiscono a due milestone temporali di riferimento:

- il 2025, emerso dalle interviste effettuate dalla Ambrosetti con gli operatori di mercato e gli esperti e da un'analisi critica della letteratura di riferimento, quale anno "spartiacque" per il lancio dell'auto elettrica e di tendenziale parità tecnologica tra propulsione elettrica e a motore termico.
- il 2030, indicato dai rappresentanti del settore automotive coinvolti nell'iniziativa e dagli altri esperti intervistati dalla Ambrosetti quale orizzonte temporale di riferimento per raggiungere una produzione di massa, abilitata anche dall'allineamento dei costi per il cliente finale tra auto elettrica e altre modalità di propulsione.

A livello metodologico, per stimare il tasso di penetrazione nei periodi intermedi (2016-2025 e 2025-2030), nello studio e-Mobility Revolution è stata applicata una curva di evoluzione tecnologica basata sulle indicazioni degli operatori di mercato intervistati e calcolata sulla percentuale di autoveicoli elettrici sul totale delle nuove immatricolazioni in ciascun anno, per risalire all'ammontare dello stock nei due anni in esame. In merito ai volumi complessivi, è stato fatto riferimento all'attuale parco auto italiano (37 milioni di autoveicoli al 2016): in considerazione della graduale transizione dalla cultura del "possesso" a quella dell'"utilizzo", è presumibile che il parco auto complessivo subisca una diminuzione nei prossimi anni. Tuttavia, non essendoci previsioni certe su questo fenomeno, è stato assunto che lo stock nazionale di autoveicoli resti invariato, anche alla luce della stabilità registrata negli ultimi 15 anni.

Nel complesso nello studio della Ambrosetti, sono stati elaborati quattro scenari di sviluppo (basso, medio, alto e accelerato) più uno inerziale. Nello studio descritto in questo report, per ottenere un andamento con cadenza annuale delle immatricolazioni al 2030 sono stati utilizzati come fonte di dati tre dei cinque scenari sopracitati e più precisamente l'inerziale (come *worst case scenario* della penetrazione della tecnologia elettrica nel parco auto italiano), lo scenario *medio* e quello *accelerato*, che considera delle condizioni molto favorevoli (*best case scenario*) alla diffusione delle auto elettriche (es: incentivi, realizzazione di infrastrutture di supporto). Di seguito vengono dati maggiori dettagli delle caratteristiche e delle assunzioni di ciascuno dei tre scenari dello studio della Ambrosetti utilizzato nella nostra analisi:

- *Scenario inerziale*: è stato calcolato a partire dalla proiezione del tasso medio annuo di crescita composto del periodo 2005-2016 in Italia (+30,4%). In questo scenario si attendono 133.000 autoveicoli elettrici in Italia al 2025 (pari allo 0,4% del parco circolante nazionale) e mezzo milione al 2030 (pari a circa l'1% del parco circolante nazionale);
- *Scenario medio*: è stato considerato il parere della maggior parte degli operatori di mercato intervistati che concorda sul fatto al 2030 il 30% del venduto sarà elettrico. In tale scenario gli autoveicoli elettrici in circolazione potrebbero arrivare ad 1 milione nel 2025 (pari al 3% del parco circolante nazionale) e a 3 milioni nel 2030 (8%);
- *Scenario accelerato*: tale scenario considera una penetrazione nel medio-lungo periodo molto favorevole alla diffusione delle autovetture elettriche, anche in considerazione delle strategie delle maggiori case produttrici. Questo scenario "accelerato" potrebbe portare a 3 milioni di autoveicoli elettrici al 2025 (8% del parco circolante nazionale) e a 9 milioni al 2030 (24%).

Tramite interpolazione dei dati di immatricolazione per gli anni 2025 e 2030 dei tre scenari appena descritti e considerando contestualmente lo storico sui dati di mezzi elettrici immatricolati dal 2010 al 2016, sono stati ricavate le proiezioni delle immatricolazioni di mezzi elettrici che si avrebbero annualmente nei tre casi considerati, di cui si riportano grafici e tabelle di seguito. Per coerenza con lo studio della Ambrosetti, a partire dalle cui stime sono stati calcolati valori in tabella, i tre scenari analizzati nel nostro studio sono anch'essi denominati inerziale, medio e accelerato.

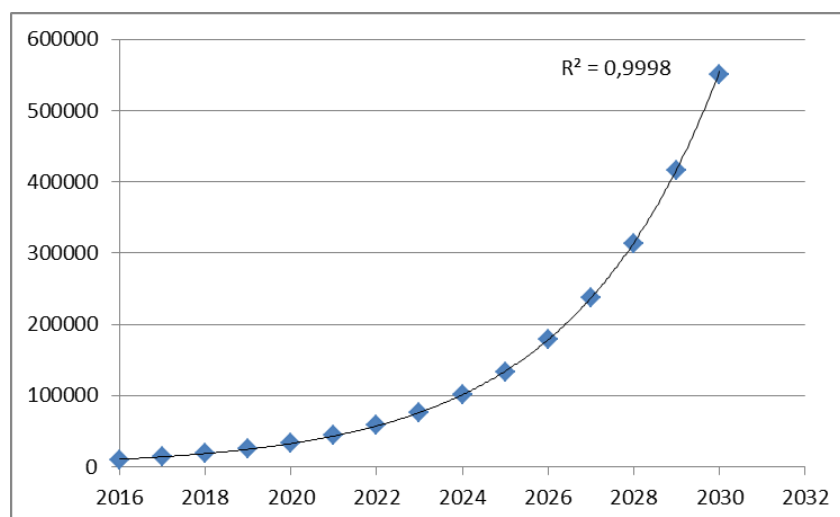


Figura 1. Grafico di immatricolazione annuale delle auto elettriche considerando lo scenario inerziale

Tabella 1. Valori di immatricolazione annuale calcolati sulla base dello scenario inerziale

Sc. Inerziale	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
N° batterie	640	760	1420	2470	3990	6130	9820	14115	18676	24809
2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
32892	43598	57790	76601	101536	133000	178398	236468	313442	415472	550713

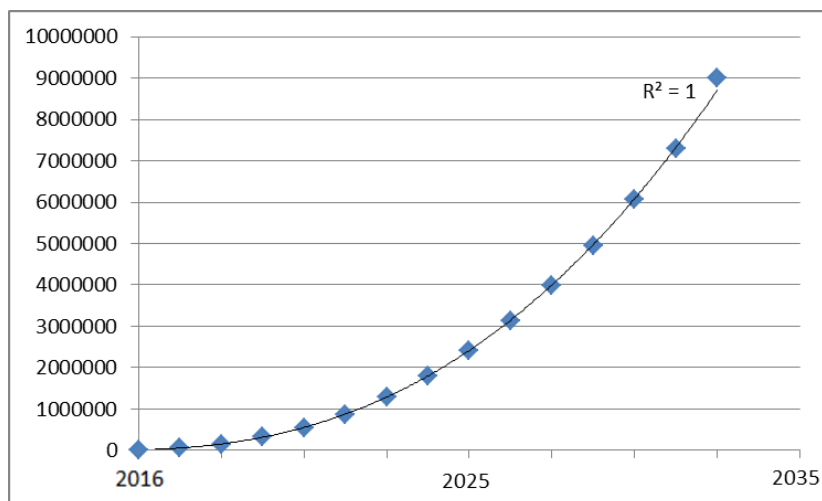


Figura 2. Grafico di immatricolazione annuale delle auto elettriche considerando lo scenario accelerato

Tabella 1. Valori di immatricolazione annuale calcolati sulla base dello scenario accelerato

Sc. Accelerato	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
N° batterie	640	760	1420	2470	3990	6130	9820	55459	153273	315291
2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028		
551677	871381	1282499	1792481	2408264	3136370	3982970	4953937	6054887		
2029	2030									
7291208	9000000									

2.1 Le ipotesi dello studio: le tre tecnologie di riferimento considerate nel modello per le batterie di trazione ed i quantitativi di Litio, Nichel, Manganese e Cobalto in esse contenute

L'innovazione tecnologica nel campo delle batterie di trazione al momento è un aspetto caratterizzante dei veicoli elettrici. Le ricerche nel campo dei sistemi di accumulo cercano contestualmente di ridurre il peso del pacco batterie in un'ottica di riduzione dei consumi e di accrescere la capacità di accumulo al fine di aumentare l'autonomia dei veicoli elettrici. In questa parte si offre una descrizione dei quantitativi di materie prime del catodo analizzate nel presente studio per le tre tecnologie di batterie considerate nel modello, senza entrare nel dettaglio di tali tecnologie.

Le batterie considerate nel modello sono:

- le attuali batterie di trazione della Nissan Leaf agli ioni di litio di 24 kWh di capacità che utilizzano la cosiddetta tecnologia LMO agli ossidi di manganese per i veicoli immatricolati tra il 2010 ed il 2018;
- le batterie agli ioni di litio con tecnologia NMC 622 e capacità di 40 kWh (contenenti cioè 6 parti di nichel, 2 parte di manganese e 2 di cobalto) utilizzata nella nuova versione della Nissan Leaf sono

state definite nel modello della nostra simulazione come batterie di riferimento per i veicoli che verranno immatricolati dal 2019 al 2025;

- infine, le batterie agli ioni di litio con cosiddetta tecnologia NMC 811 (8 parti di nichel, 1 parte di manganese e 1 di cobalto) che nel modello si ipotizza abbiano capacità pari a 50 kWh e che verranno utilizzate nelle auto immatricolate dal 2026 al 2030.

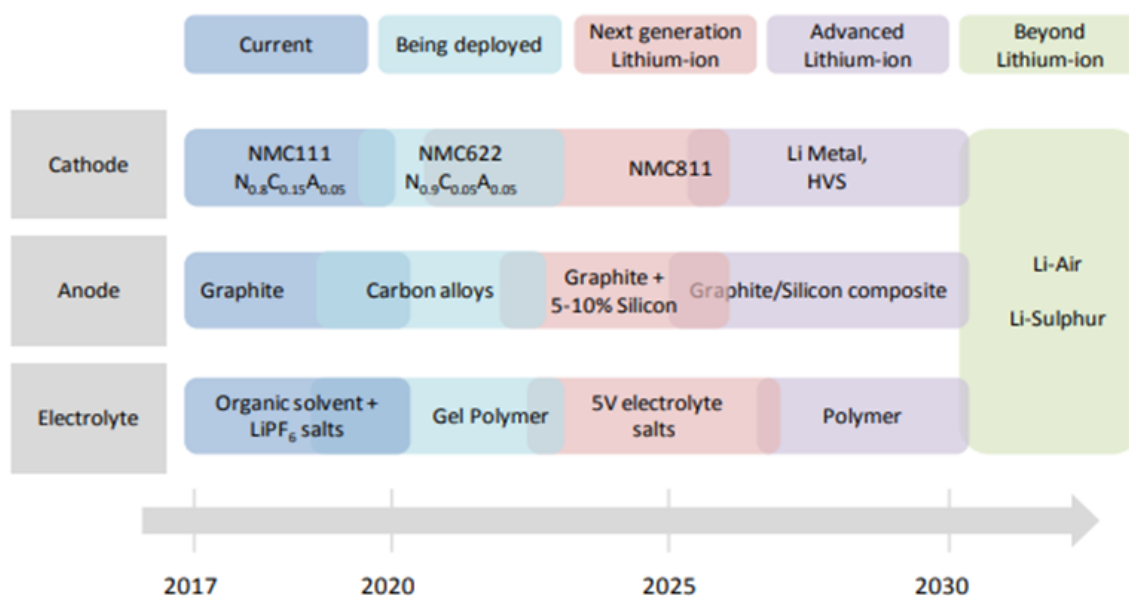


Figura 3. Timeline della commercializzazione delle nuove tecnologie delle batterie per EV

Fonte: "Global EV Outlook 2018", 2018

Una volta definite le tecnologie di riferimento, nel modello sono stati inseriti come dati di input i quantitativi di Litio, Nichel, Manganese e Cobalto per pacco batterie montato su ogni veicolo immatricolato. Tali quantitativi per le tre tecnologie considerate sono quelli riportati in Tabella 3.

Tabella 2. Quantitativi per unità di batteria considerata nell'analisi per ognuna delle tre tecnologie considerate

CRM	LMO	NMC 622	NMC 811
Litio	2 kg	5,2 kg	5,5 kg
Manganese	13 kg	8 kg	4,5 kg
Cobalto	0	7,6 kg	4,5 kg
Nichel	0	24,4 kg	37,5 kg

La definizione dei quantitativi di Litio e Manganese contenuti nelle batterie della Nissan Leaf che ricorre alla tecnologia LMO è stata ottenuta dal confronto tra i valori proposti dal database Ecoinvent 3. ed i dati calcolati da uno studio dell'EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology), a cui si rimanda per maggiori approfondimenti.

Per quanto riguarda le due tecnologie NMC 622 e NMC 811 delle batterie prese come riferimento nel modello per le auto che verranno immatricolate rispettivamente nel periodo 2019-2025 e nel periodo 2026-2030, non avendo a disposizione un dettaglio dei quantitativi delle materie prime che contengono, queste sono state calcolate a partire dalle percentuali dei diversi minerali proposte dall' OECD/IEA nel Global EV Outlook 2018, Towards cross-modal electrification del 2018 di cui si riporta alla Figura 5 una tabella riassuntiva.

kg/kWh	Li	Ni	Co	Mn
NCA	0.10	0.67	0.13	0.00
NMC 111	0.15	0.40	0.40	0.37
NMC 433	0.14	0.47	0.35	0.35
NMC 532	0.14	0.59	0.23	0.35
NMC 622	0.13	0.61	0.19	0.20
NMC 811	0.11	0.75	0.09	0.09
LFP	0.10			

Figura 4. Elementi presenti nelle diverse batterie per ogni kWh

Fonte: IEA, 2018 Global EV Outlook 2018: Towards cross-modal electrification, IEA, Paris.

Essendo i valori proposti in tabella riferiti all'unità di energia che la batteria è in grado di immagazzinare, si è fatto ricorso ai valori di capacità della batteria riportati nella scheda tecnica della Nissan Leaf sul proprio sito. Quanto al valore di capacità della versione NMC 811, che costituisce la tecnologia di riferimento per il periodo 2026-2030 nel modello previsionale realizzato nello studio, si è ipotizzato che rimanga pari a quello della batteria con tecnologia NMC 622, ovvero 40 kWh.

2.2 Le ipotesi dello studio: l'evoluzione tecnologica dei processi di riciclo e l'andamento previsto per le percentuali di raccolta

Il modello costruito per valutare i flussi di materie prime seconde in uscita dalla stock, costituito dalle batterie del parco elettrico italiano, si compone da un lato di tutti i dati di input descritti nei paragrafi 2.1 e 2.2, dall'altro dei parametri funzione dell'efficienza di raccolta, recupero e riciclo delle batterie del sistema di gestione ipotizzato. Nel documento *Analisi dei flussi e studio dei mercati reali e finanziari delle materie prime presenti negli autoveicoli elettrici e nelle colonnine di ricarica 2018*, si desume come per ogni differente tipologia di batteria ci siano diverse materie prime (es. litio, cobalto, grafite, neodimio, praseodimio, disprosio, etc.). Alcune di queste sono utilizzate nei rivestimenti o negli accessori, quelle utilizzate all'interno delle celle devono avere caratteristiche particolari, per questo hanno solitamente un valore economico molto alto e difficilmente trovano un sostituto che dia le stesse prestazioni. È importante notare come i consumi di queste materie prime saranno quelli che più risentiranno in futuro dell'aumento della domanda dei veicoli elettrici (Figura 5).

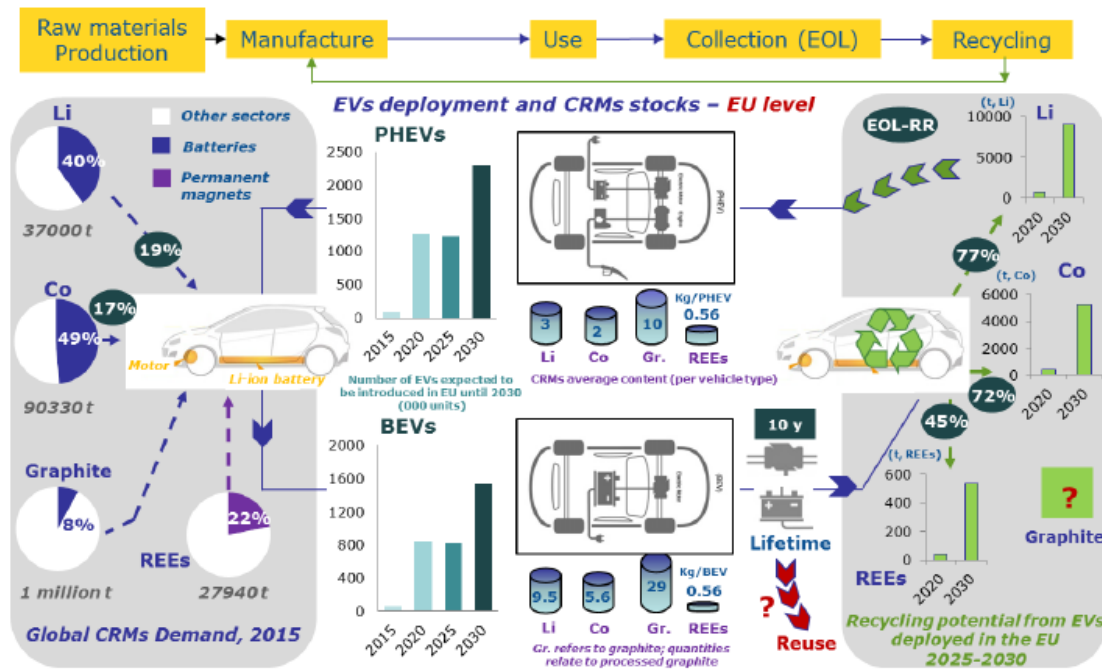


Figura 5. Materie prime significative utilizzate nei veicoli elettrici e i potenziali flussi dal riciclaggio in UE

Fonte: European Commission, 2018. "Commission Staff Working Document. Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy"

I metalli all'interno delle batterie possono essere riciclati, per cui oltre ai mercati delle materie prime è necessario considerare quello delle materie prime seconde, che soprattutto per litio e cobalto sta sviluppando un'industria interessante, come è avvenuto per il piombo delle vecchie batterie.

Capire la strada giusta per le batterie al termine della loro vita è complesso, date le molte opzioni disponibili e lo sviluppo tecnologico rapido delle batterie a ioni di litio, che variano per materiali, dimensioni, forma e quantità degli elementi catodici. La direttiva 2006/66/CE del Parlamento europeo permette di mandare fuori dai confini nazionali le batterie da riciclare, purché siano rispettate certe norme di sicurezza, l'esportazione può avvenire anche in Paesi al di fuori della Comunità europea. In Italia, attualmente, la prassi seguita è quella dell'esportazione, abbiamo infatti numerosi centri di raccolta con buone percentuali di recupero delle batterie usate ma non ci sono impianti di riciclaggio. Questo perché il prezzo attuale sul mercato dei materiali non è sufficientemente elevato da rendere conveniente l'investimento in impianti di riciclaggio, a differenza di quanto avviene per altre tecnologie. Francisco Carranza, responsabile Energy service di Nissan, afferma che il problema fondamentale è che mentre il costo del riciclaggio completo di una batteria scende a 1 € al chilo, il valore delle materie prime che possono essere recuperate è solo un terzo di quello. Un altro aspetto da considerare, è che la vita attesa di una batteria a ioni di litio per EV è superiore a quella del veicolo (spesso pari all'80% della capacità). Si potrebbero sviluppare quindi procedure per il suo riutilizzo in altre applicazioni, in particolare in applicazioni a supporto del sistema elettrico come l'alimentazione stazionaria e il livellamento del carico di rete. Sempre nel suddetto documento si fa esplicito riferimento alla seconda vita nell'ambito dell'accumulo energetico (*storage*) delle batterie elettriche una volta esaurita la loro capacità di essere utilizzate nel campo della trazione veicolare. Molte case automobiliste, tra cui BMW, Nissan, Renault ed altre, hanno proposto, almeno finché gli impianti di trattamento non siano a regime, di utilizzare le batterie per l'energy storage, cioè un riutilizzo come stoccaggio della rete, allungando la vita delle batterie potenzialmente per ulteriori dieci anni. I sistemi di stoccaggio a griglia utilizzano batterie che non possono più essere utilizzate per alimentare le auto elettriche, ma che possedendo

ancora tra il 70 e l'80% della capacità di alimentazione originaria, e che possono essere quindi utilizzate in modo efficiente per questo servizio. Nel 2018 la Bloomberg New Finance stima che circa il 27% delle batterie a ioni di litio per la trazione elettrica siano riutilizzate in una seconda vita. La strada del riuso viene prospettata anche da Giancarlo Morandi, presidente di Cobat, sottolineando che il secondo ciclo di vita determinerà molto probabilmente una riduzione considerevole dei loro costi di trattamento e recupero finali.

Le tecnologie e le infrastrutture industriali sono molto progredite negli ultimi anni, tuttavia, il litio non viene recuperato o viene recuperato con impurità che lo rendono non adatto per il riutilizzo nella produzione di batterie.

L'obiettivo degli sforzi di riciclaggio è incentrato sui materiali catodici, in quanto costituiscono un'alta percentuale della massa totale della batteria e del costo, inoltre il catodo contiene anche metalli critici di interesse. Naturalmente, gli scenari di utilizzo secondari sopra descritti ritarderebbero l'arrivo di questi materiali alle operazioni di riciclaggio a fine vita.

Sulla base delle evidenze appena elencate, sono stati definiti dei fattori che replicassero la realtà delineata da tali dati e che dessero descrizione su base annuale di come evolveranno percentuali di recupero e riciclaggio, sulla base dello sviluppo previsto per le tecnologie di trattamento delle batterie a livello italiano. Si è dunque considerata una vita utile media come batterie di trazione di 8 anni e un riutilizzo con funzione di *storage* compreso tra i 5 e i 10 anni. Un dettaglio dei fattori utilizzati è riportato nella Tabelle 8, 9 e 10. Si noti come per il riciclaggio del Litio si ipotizzi che le percentuali tendano più lentamente verso il limite del 90% (raggiunto al 2030) data la minore maturità di tecnologie adatte al suo recupero.

Tabella 3. Parametri di efficienza di riciclaggio e di percentuale di batterie recuperate in ambito storage per il Litio nello scenario accelerato

Litio	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
% riciclaggio	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	10%	20%	40%
% storage	5%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	50%	50%	50%
2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	
80%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%

Tabella 4. Parametri di efficienza di riciclaggio e di percentuale di batterie recuperate in ambito storage per il Manganese nello scenario accelerato

Manganese	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
% riciclaggio	50%	50%	60%	70%	80%	90%	90%	90%	90%	90%
% storage	5%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	50%	50%	50%
2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	
80%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%

Tabella 5. Parametri di efficienza di riciclaggio e di percentuale di batterie recuperate in ambito storage per il Cobalto ed il Nichel nello scenario accelerato

Cobalto/Nichel	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038
% riciclaggio	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%

% storage	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Si sottolinea come alla base del modello ci sia l'ipotesi che in un periodo ragionevolmente breve (5-10 anni) il nostro paese si doti di un efficiente sistema di raccolta, recupero e riciclaggio delle batterie elettriche. Questa ipotesi è diretta conseguenza del fatto che l'obiettivo dello studio è proprio indagare le potenzialità offerte da tale ipotetico scenario in termini di flussi di materie prime seconde e anche in termini di opportunità economiche legate al loro sfruttamento. È giustificabile in tal senso la rapida crescita nel modello dei fattori funzione dell'efficienza di recupero e riciclaggio delle batterie fino ad arrivare a un valore limite. I due plateau che questi fattori raggiungono, rispettivamente pari al 50% e al 90%, sono espressione del limite definito dalle linee guida sul tema sia in Europa che in Cina, che assicurano che almeno la metà delle batterie verranno riciclate e da quanto stabilito dalla direttiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo (Allegato III) che stabilisce che almeno il 50% in peso di materiali delle batterie debba essere riciclato nel primo caso, e di un limite tecnico di efficienza legato alla complessità nella progettazione di una linea di processo per il riciclo delle batterie nel secondo caso: questa infatti dovrà essere sufficientemente flessibile da poter lavorare tipologie di batterie che potranno avere caratteristiche anche molto diverse data la rapida e poco prevedibile evoluzione delle tecnologie di batterie attualmente in fase prototipale che riusciranno a raggiungere un livello industriale di sviluppo. In tal senso un approccio di eco-progettazione delle batterie che sia improntato su un *design for recycling* potrebbe favorire ancor più elevati livelli di efficienza (> 90%) nella produzione di materie prime seconde.

3. ANALISI DEI RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 I flussi di materie prime seconde resi disponibili dal riciclaggio delle batterie elettriche di trazione secondo il modello realizzato nello studio

Sulla base di tutte delle ipotesi precedentemente descritte, sono stati calcolati anno per anno dal 2019 al 2038 i quantitativi di materie prime seconde ottenibili dalle batterie a fine della loro vita utile, sia nel caso questa sia stata limitata all'ambito dell'autotrazione che nel caso in cui si sia estesa di ulteriori 8 anni nell'ambito dello storage di energia.

In figura un semplice diagramma che riporta i quantitativi presenti in una batteria LMC 622 e quelli recuperati a fine vita.

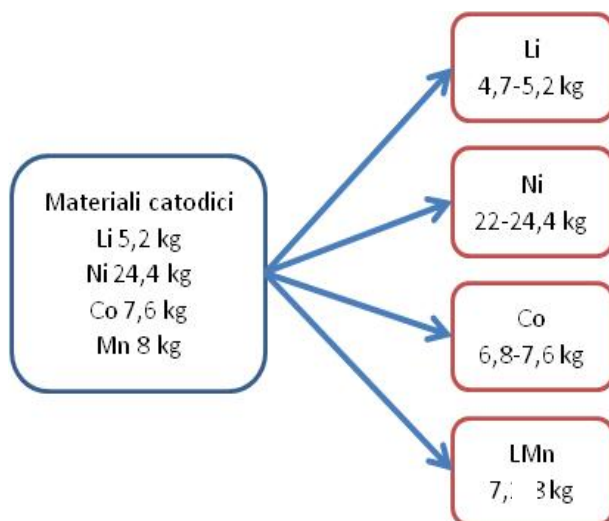


Figura 6. Materiali riciclati dalla batteria da 40 kWh della nuova Nissan Leaf (NCM 622)

Nelle tre tabelle che seguono i flussi di materie prime seconde recuperabili dallo stock di batterie immesse nel mercato nel periodo 2010-2030 per i tre scenari di penetrazione della mobilità elettrica nel contesto italiano, lo scenario *inerziale*, quello *medio* e quello definito *accelerato*, che ad oggi appare il più probabile dato i crescenti investimenti nella mobilità elettrica da parte delle case automobilistiche e la recente dichiarazione del governo italiano di voler introdurre importanti incentivi per favorire l'acquisto di auto elettriche nei prossimi anni. I risultati sono riportati in kg e tengono conto del *delay* dei flussi in uscita legato alla seconda vita delle batterie dopo l'utilizzo nel settore automotive, che è funzione delle percentuali di recupero in ambito storage elencate nelle tabelle al paragrafo precedente.

Tabella 6. Flussi in kg di materie prime seconde ottenibili secondo le ipotesi dello scenario inerziale

Sc. Inerziale	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Litio	4	7	25	80	1,8E+02	3,9E+02	7,1E+02	1,9E+03	1,3E+04	3,5E+04
Manganese	445	831	2890	9337	2,2E+04	5,0E+04	8,7E+04	1,1E+05	9,2E+04	1,2E+05
Cobalto	0	0	0	0	0	0	0	0	8,5E+04	1,1E+05
Nichel	0	0	0	0	0	0	0	0	2,7E+05	3,6E+05
2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	
9,2E+04	1,4E+05	1,8E+05	2,4E+05	3,4E+05	4,6E+05	6,4E+05	8,5E+05	1,1E+06	1,5E+06	
1,7E+05	2,3E+05	3,1E+05	4,2E+05	2,7E+05	4,7E+05	5,7E+05	7,5E+05	1,0E+06	1,3E+06	
1,5E+05	2,0E+05	2,6E+05	3,5E+05	2,7E+05	3,6E+05	5,6E+05	7,5E+05	9,9E+05	1,3E+06	
4,8E+05	6,3E+05	8,4E+05	1,1E+06	2,2E+06	3,0E+06	4,3E+06	5,7E+06	7,5E+06	9,9E+06	

Tabella 7. Flussi in kg di materie prime seconde ottenibili secondo le ipotesi dello scenario accelerato

Sc. Accelerato	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Litio	4	7	25	80	184	393	2773	1,5E+04	1,6E+05	5,7E+05
Manganese	445	831	2890	9337	2,2E+04	4,9E+04	3,3E+05	9,0E+05	1,1E+06	2,0E+06
Cobalto	0	0	0	0	0	0	0	0	1,1E+06	1,9E+06
Nichel	0	0	0	0	0	0	0	0	3,5E+06	6,1E+06
2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	
1,8E+06	3,0E+06	4,2E+06	5,6E+06	7,8E+06	1,0E+07	1,3E+07	1,6E+07	2,0E+07	2,4E+07	
3,1E+06	4,6E+06	6,5E+06	8,7E+06	6,7E+06	9,0E+06	1,1E+07	1,4E+07	1,8E+07	2,2E+07	
3,0E+06	4,4E+06	6,1E+06	8,2E+06	6,4E+06	8,1E+06	1,1E+07	1,4E+07	1,8E+07	2,2E+07	
9,6E+06	1,4E+07	2,0E+07	2,6E+07	5,3E+07	6,7E+07	8,7E+07	1,1E+08	1,3E+08	1,6E+08	

Per completezza nella tabella che segue si riportano i quantitativi di materie prime seconde potenzialmente recuperabili di anno in anno espressi in tonnellate se non ci fosse un riutilizzo in ambito storage. Si tratta del quantitativo di Litio, Manganese, Cobalto e Nichel contenuto nelle batterie che di anno in anno può accedere al mercato delle materie prime seconde (90% del totale) secondo le ipotesi del modello costruito nello studio e serve a dare un'idea del potenziale di materie prima sfruttabili dal trattamento delle batterie elettriche di trazione senza ricorrere all'estensione della vita utile. Si tratta di un prospetto che potrebbe rappresentare un supporto alle decisioni per valutare con un approccio costi-benefici quale sia la strategia più conveniente di smaltimento delle batterie esauste.

Tabella 8. Flussi in tonnellate di materie prime seconde ottenibili riciclando il 90% delle materie prime contenute nelle batterie elettriche senza riutilizzo in ambito storage

Max Potenziale	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Litio	1,4	2,6	4,4	7,2	11,0	17,7	99,8	275,9	567,5	993,0
Manganese	8,9	16,6	28,9	46,7	71,7	114,9	648,9	1793,3	3688,9	6454,6
Cobalto	0	0	0	0	0	0	0	0	2156,6	3773,5
Nichel	0	0	0	0	0	0	0	0	6923,8	12114,8
2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	
1568,5	2308,5	3226,5	4334,9	5645,5	7169,3	8917,1	10898,8	13124,2	15602,6	
10195,2	15005,2	20972,0	28176,7	36695,5	46600,7	57961,1	70842,2	85307,1	101416,6	
5960,2	8772,3	12260,6	16472,5	21452,8	27243,5	33884,9	41415,4	49871,9	59289,7	
19135,5	28163,7	39362,9	52885,5	68874,7	87466,0	108788,5	132965,3	160114,9	190351,2	

4. CONCLUSIONI

Nello studio è stata realizzata una quantificazione dei flussi di materie prime seconde ottenibili anno per anno da un sistema di riciclaggio dei materiali catodici (lito, manganese, nichel e cobalto) delle batterie elettriche di trazione che giungono a fine vita utile secondo tre differenti scenari di penetrazione della mobilità elettrica nel parco autoveicoli italiano. Tale analisi previsionale è stata completata da una valutazione di massima della fattibilità economica del sistema di riciclaggio, ipotizzato che ha delineato l'andamento dei ricavi legati alla commercializzazione delle materie prime seconde recuperate a fronte dei costi di trattamento, includendo anche una stima monetaria delle esternalità ambientali.

I risultati dello studio si propongono di fatto come elemento di supporto alle decisioni per la valutazione dell'opportunità della creazione di una filiera di trattamento delle batterie elettriche di trazione veicolare. Pur considerando il margine di incertezza intrinsecamente legato ai risultati di uno studio previsionale, alcuni andamenti tendenziali sembrano poter costituire elementi sulla base dei quali prendere in considerazione l'implementazione del sistema proposto. Alla luce degli investimenti previsti dalle principali case automobilistiche e degli incentivi preannunciati dal governo italiano per la mobilità sostenibile, lo scenario di maggiore penetrazione degli autoveicoli elettrici (nello studio, scenario accelerato) appare il più probabile dei tre analizzati. Dunque, nei prossimi anni assisteremo con buona probabilità al crescere dello stock di materie prime per le batterie di trazione immagazzinate nei mezzi circolanti, materie prime che potrebbero rientrare nel mercato delle materie seconde secondo l'andamento previsto dallo studio. Si tratta di un quantitativo di batterie da trattare e di potenziali materie prime seconde che raggiungerebbe la massa critica individuata di 4.000 t/a di batterie (report *Analisi dei flussi e studio dei mercati reali e finanziari delle materie prime presenti negli autoveicoli elettrici e nelle colonnine di ricarica 2018*) già dal 2027 - per lo scenario accelerato - pur avendo considerato il delay delle batterie in ingresso a trattamento, legato al loro utilizzo in ambito storage a fine della vita utile nel settore dell'autotrazione. L'analisi, oltre ad aver evidenziato come siano raggiungibili i volumi necessari per la fattibilità tecnica di un sistema di riciclaggio, ha dato evidenza di come con buona probabilità sia garantita la fattibilità economica dello stesso. Considerando, come già detto, lo scenario accelerato come il più probabile, le economie di scala attivabili dai volumi di batterie da smaltire, faranno tendere i costi di trattamento verso i valori più bassi considerati nello studio (1.000 \$/t) e questo potrebbe garantire la sopravvivenza economica del sistema anche considerando il valore minimo di ricavo calcolato per lo scenario accelerato. Pur non includendo nella valutazione il riciclaggio della grafite, al momento non convenientemente recuperabile, gli andamenti tendenziali dei costi delle materie prime

(soprattutto per il Cobalto) sembrano tendere negli anni ai valori massimi, dando una concreta possibilità allo scenario che configura i livelli massimi di ricavo, di essere quello su cui ci si assesterà nel medio termine. Difficile prevedere cosa succederà dopo il 2040 (lo studio si ferma infatti all'analisi dei flussi in uscita al 2038) dato che la tecnologia di produzione delle batterie dovrebbe superare il ricorso agli ioni di litio anche nella sua versione più innovativa (NMC 811), con un più bassa percentuale di Cobalto. In ogni caso fino a quell'anno i materiali in arrivo a trattamento garantirebbero la profittabilità di un sistema di riciclaggio, che una volta a regime potrebbe meglio assorbire anche la necessità di modifiche tecniche, per il trattamento di innovativi sistemi di accumulo, e un conseguente diverso meccanismo di remunerazione.

Non va infine dimenticato che lo scenario zero con cui confrontare tutti gli scenari finora discussi, non può essere considerato quello di non gestione delle batterie a fine vita. Se finora, dati i bassi volumi in gioco e una normativa carente, il problema del trattamento delle batterie a fine vita è stato considerato differibile o delegabile a paesi terzi interessati al recupero dei materiali in esse contenuti (principalmente Cina), in breve tempo la gestione delle batterie esauste rappresenterà un problema e contestualmente un'opportunità. Il problema sarà costituito quanto meno dalla necessità per il nostro paese di dotarsi di un sistema di raccolta, con tutte le difficoltà tecniche connesse ed i costi di gestione ad esso legati. L'opportunità sarà, invece, rappresentata dalla possibilità di creare in Italia un sistema di raccolta e riciclo delle batterie a fine vita, da cui provvedere al recupero delle materie prime seconde con volumi in linea con quanto contabilizzato da questo studio. Tali volumi permetterebbero la creazione di una filiera di produzione di materie prime seconde non altrimenti producibili nel nostro paese, con conseguente creazione di posti di lavoro ad essa dedicati. Esportare le batterie e delegare il trattamento e riciclo delle stesse a paesi terzi causerebbe l'importante perdita di valore su cui il nostro paese investirà, anche con sistemi incentivanti di iniziativa pubblica, andando ad aumentare nei prossimi anni lo stock di mezzi elettrici circolanti. Stock che può costituire un considerevole giacimento di materie prime seconde, in grado sul lungo termine di supportare l'alimentazione di filiere di fabbricazione di prodotti ad alto valore aggiunto, come le batterie da materiali riciclati o garantire flussi di materiali ad altri settori strategici per il nostro paese e l'Europa (ceramica e vetro, litio; metallurgico, manganese, cobalto, nichel). In tal senso il set di informazioni generato da questo studio può essere dunque considerato un utile elemento di supporto nella definizione di una strategia nazionale per lo sfruttamento dell'elevato valore residuo delle batterie di trazione a fine vita, in un'ottica di implementazione dell'economia circolare e dell'uso efficiente delle risorse.

BIBLIOGRAFIA

- Cutaia L., Porta P.L., Chiavetta C., La Monica M., Scagliarino C., 2018 Valutazione dei materiali critici negli scenari di elettrificazione della mobilità urbana. Report RdS/PAR2017.
- Cutaia L., Chiavetta C., Porta P.L., La Monica M., Scagliarino C. Raw materials requirements scenarios for the electric mobility penetration in the Italian urban vehicle fleet: a life cycle thinking approach for the evaluation of the primary material needed. Proceedings of 28th SETAC Europe Annual Meeting, 13-17 Maggio 2018, Roma, Italia.
- Cutaia, L., La Monica, M., Scagliarino, C., Massacci, G., Nania, F., 2018. Analisi dei flussi e studio dei mercati reali e finanziari delle materie prime presenti negli autoveicoli elettrici e nelle colonnine di ricarica. Report RdS/PAR2017/253.
- Ecoinvent database 3.4, 2018.
- ENEL, The European House – Ambrosetti, 2017. E-MOBILITY REVOLUTION. Gli impatti sulle filiere industriali e sul sistema-Paese: quale Agenda per l'Italia. https://www.ambrosetti.eu/wp-content/uploads/ENEL_e-Mobility-Revolution_Ricerca-2017_ITA.pdf
- European Commission, 2018. Commission Staff Working Document. Report on Critical Raw Materials and the

- Circular Economy. Brussels, 16.1.2018. SWD(2018) 36 final
- European Union, 2006. Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC (Text with EEA relevance). OJ L 266, 26.9.2006, p. 1–14
- IEA, 2018. Global EV Outlook 2018: Towards cross-modal electrification, IEA, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264302365-en>.
- Green Report.it, 2018. “La seconda vita delle batterie delle auto elettriche sarà il grande game changer dell’energia pulita?”. <http://www.greenreport.it/news/economia-ecologica/la-seconda-vita-delle-batterie-delle-auto-elettriche-sara-il-game-changer-dellenergia-pulita/>
- Messenger B., 2018. “In Depth: Lithium Battery Recycling – The Clean Energy Clean Up”. <https://waste-management-world.com/a/in-depth-lithium-battery-recycling-the-clean-energy-clean-up>
- Nissan, 2018. <https://www.nissan.it/veicoli/veicoli-nuovi/leaf.html>
- Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wager, P., Stamp, A., Zah, R., & Althaus, H. J., 2010. Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science & Technology* 44 (17), 6550-6556. DOI: 10.1021/es903729a