



**Politecnico  
di Torino**

## Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale

Percorso Gestione dell'Innovazione e Imprenditorialità

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Aprile 2025

# **Batterie EV di seconda vita:**

studio delle possibili supply chain future, riciclo e riutilizzo

Relatore:

Giovanni Zenezini

Candidato:

Giovanni Cicero

Correlatori:

Giulio Mangano

Anna Cagliano

# Sommario

<b>1. Introduzione</b>	4
1.1 Contesto e motivazioni	4
1.2 Obiettivi della ricerca	5
1.3 Metodologia e approccio adottato	6
<b>2. La batteria agli ioni di litio</b>	6
2.1 Struttura e principio di funzionamento	6
2.2 Materiali e composizione chimica delle batterie	8
2.3 Tecnologia e funzionamento nei veicoli e come ESS (energy storage system)	9
2.3.1 Specifiche tecniche di una batteria per veicoli elettrici (EV)	9
2.3.2 Specifiche tecniche di una batteria per sistemi di accumulo energetico (ESS)	10
2.4 Durata di vita e degrado delle batterie EV	11
2.5 Normative e regolamentazioni sul riutilizzo delle batterie in Europa	14
2.6 Second life delle batterie: Sfide e criticità del riciclo o riutilizzo	16
<b>3. Studio del problema</b>	17
3.1 Approvvigionamento delle materie prime	17
3.1.1 La strategia Europea sui materiali critici	18
3.2 Produzione delle batterie EV	19
3.3 Domanda di batterie EV in Europa e nel mondo, trend e progetti futuri	20
<b>4. La Supply chain delle batterie EV</b>	22
4.1 Attori coinvolti nella filiera delle batterie usate	23
4.1.1 Estrazione, lavorazione e produzione	23
4.1.2 Assemblaggio e implementazione nel veicolo	25
4.1.3 Dismissione e riciclo	27
4.2 Processo di selezione e testing delle batterie dismesse	30
<b>5. Modellazione supply chain con Vensim (approccio System Dynamics)</b>	31
5.1 Introduzione alla metodologia System Dynamics	31
5.2 Strutturazione del modello: variabili chiave e relazioni	32
5.3 Stima della domanda di batterie di accumulo per il settore residenziale in Europa	52
5.4 Scenari di simulazione e risultati attesi	53
5.5 Limiti del modello	56
<b>6. Considerazioni finali</b>	57
<b>7. Ringraziamenti</b>	59
<b>8. Riferimenti</b>	60

## **Abstract**

L'adozione sempre più diffusa dei veicoli elettrici (EV) sta causando un significativo aumento del numero di batterie agli ioni di litio che giungono alla fine della loro vita utile nel settore dei trasporti. Tuttavia, sebbene non siano più adatte all'uso automobilistico queste batterie conservano ancora una capacità residua sufficiente per applicazioni meno gravose, come lo stoccaggio energetico stazionario.

Questa tesi esamina la fattibilità del riciclo delle batterie EV di seconda vita con particolare attenzione al contesto Europeo. Dopo aver analizzato la tecnologia delle batterie attualmente disponibile e i futuri sviluppi tecnologici previsti, lo studio esplora la supply chain delle batterie, con particolare attenzione agli aspetti logistici, tecnici e normativi che ne influenzano il processo di riciclo.

A supporto dell'analisi, viene sviluppato un modello di simulazione dinamica utilizzando il software Vensim, basato su un approccio System Dynamics. Il modello viene impiegato per identificare le variabili più significative della supply chain delle batterie di seconda vita e valutare diversi scenari per il loro utilizzo nello stoccaggio energetico. Oltre al riutilizzo delle batterie, si esaminano i benefici apportato da processi di riciclo avanzati.

I risultati della ricerca indicano che il riciclo delle batterie EV rappresenta un approccio valido per migliorare l'efficienza delle risorse, ridurre la dipendenza da materie prime da estrazione e contribuire alla costituzione di una supply chain circolare in Europa. Lo studio evidenzia inoltre le principali sfide da affrontare, tra cui la variabilità delle condizioni delle batterie dismesse, i limiti attuali in tema di standardizzazione e la difficoltà dell'Europa nel trovare l'indipendenza da altri paesi in termini di approvvigionamento delle materie critiche.

Questa ricerca fornisce una base per la valutazione strategica del riciclo delle batterie nel processo di transizione verso un sistema energetico più sostenibile, suggerendo le possibili tendenze future nello sviluppo della mobilità elettrica e dell'accumulo energetico.

# **1. Introduzione**

## **1.1 Contesto e motivazioni**

La transizione verso la mobilità elettrica, ormai in atto da diversi anni, è diventata una delle principali strategie per ridurre le emissioni di gas serra e contrastare il cambiamento climatico. Le batterie per auto elettriche rappresentano il cuore di questa rivoluzione, ma al tempo stesso sono oggetto di nuove sfide ambientali ed economiche, legate ai diversi stadi della supply chain. In questo contesto, diventa cruciale sviluppare soluzioni sostenibili per la produzione, il corretto uso, il riutilizzo e il riciclo delle batterie, riducendo così l'impatto ambientale complessivo della mobilità elettrica.

L'adozione su larga scala dei veicoli elettrici ha portato a una crescente domanda di batterie ad alte prestazioni, ma il ciclo di vita di queste tecnologie solleva numerose questioni ambientali ed economiche. L'estrazione delle materie prime necessarie, come litio, cobalto e nichel, ha un impatto significativo sul territorio, sulle risorse idriche e sulle comunità locali. Inoltre, la produzione di nuove batterie comporta un'impronta di CO<sub>2</sub> che potrebbe ridurre i benefici dell'elettrificazione, se l'energia impiegata non proviene da fonti rinnovabili. Allo stesso tempo, il fine vita delle batterie rappresenta una sfida: un loro corretto recupero e riciclo può ridurre la dipendenza dalle materie prime vergini riducendo la quota proveniente dai processi estrattivi.

Parallelamente, la crescente implementazione delle fonti rinnovabili nella produzione di energia elettrica rende sempre più urgente la questione dell'accumulo energetico. L'eolico e il solare, pur essendo fonti a zero emissioni, non producono energia in modo costante, rendendo necessario un sistema efficace per immagazzinare l'elettricità in eccesso e rilasciarla nei momenti di necessità. Le batterie esauste dei veicoli elettrici, opportunamente riconvertite per usi stazionari, potrebbero fornire una soluzione vantaggiosa, riducendo la necessità di smaltimento precoce e contribuendo alla stabilizzazione della rete elettrica.

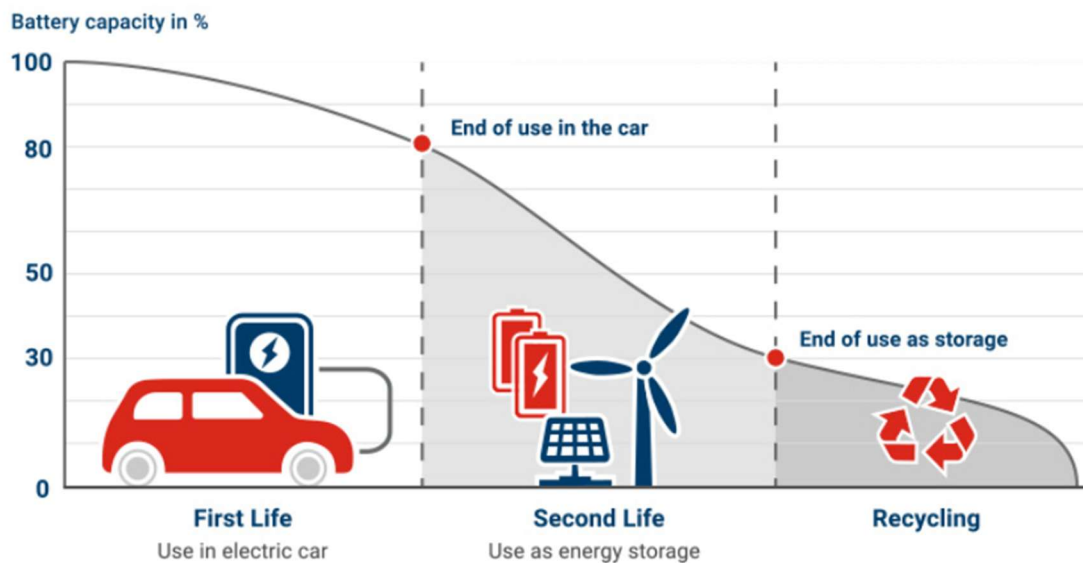


Figura 1: Ciclo di vita ottimale di una batteria EV [1]

## 1.2 Obiettivi della ricerca

Questa ricerca si concentra sulle opportunità offerte dal riutilizzo delle batterie dei veicoli elettrici, esplorando come queste possano essere reintegrate all'interno di una supply chain europea orientata alla sostenibilità. Particolare attenzione è rivolta alla loro possibile applicazione come sistemi di accumulo per fonti energetiche rinnovabili. In quest'ottica, lo studio mira a:

- Indagare le tendenze di domanda e offerta nel mercato europeo dei veicoli elettrici, valutando l'impatto sulla richiesta di batterie;
- Esplorare le potenzialità delle batterie a fine vita per usi stazionari, evidenziandone vantaggi nella loro "seconda vita";
- Analizzare le pratiche attuali di riciclo e proporre strategie migliorative per il recupero dei materiali critici, così da ridurre la dipendenza da risorse primarie;
- Valutare il contributo che le batterie rigenerate possono offrire nel contesto residenziale, in particolare alla luce della crescita della quota di produzione energetica da fonti rinnovabili.

Nel complesso, l'obiettivo è generare informazioni e prospettive utili a delineare un modello di circolarità che sia realistico e concretamente applicabile.

## 1.3 Metodologia e approccio adottato

Per affrontare il tema in maniera completa, è stato adottato un approccio integrato: si combinano analisi quantitative, studio del ciclo di vita (LCA) e confronto tra modelli di recupero e riutilizzo. Le fonti utilizzate includono pubblicazioni accademiche, report di enti internazionali e dataset ambientali. Uno degli elementi chiave è lo sviluppo di un modello dinamico tramite il software **Vensim**, con l'intento di simulare scenari futuri sull'impiego di batterie dismesse in sistemi di accumulo.

Il modello consente di osservare l'evoluzione temporale dell'offerta di batterie esauste e il loro potenziale impiego nel contesto industriale e domestico, analizzando l'effetto sull'infrastruttura elettrica e sulla domanda di nuove batterie. L'obiettivo finale è identificare condizioni ottimali per una transizione verso un sistema sostenibile di gestione delle batterie, in linea con i principi dell'economia circolare.

## 2. La batteria agli ioni di litio

### 2.1 Struttura e principio di funzionamento

#### Struttura e componenti

- **Anodo:** Spesso realizzato in grafite, talvolta integrata con silicio, funge da serbatoio per gli ioni durante la fase di carica.
- **Catodo:** Composto da ossidi di metalli di transizione (come NMC - Nichel-Manganese-Cobalto, LFP - Litio-Ferro-Fosfato o NCA - Nichel-Cobalto-Alluminio). Il catodo è il componente della batteria che determina la capacità e la tensione di lavoro della batteria.
- **Elettrolita:** Solitamente una soluzione liquida contenente sali di litio, ma sono in fase di sviluppo anche varianti solide, ibride o gel. La scelta dell'elettrolita incide direttamente sulla sicurezza e l'efficienza della batteria.
- **Separatore:** È una membrana che evita il contatto diretto tra anodo e catodo. Le versioni ceramiche o nanostrutturate offrono migliori prestazioni, anche se a costi più elevati.
- **Collettori di corrente:** Fogli metallici (rame per l'anodo, alluminio per il catodo) che permettono il passaggio degli elettroni nel circuito esterno.

## Fase di scarica

Quando la batteria è collegata a un carico elettrico avviene il seguente processo:

1. Gli ioni di litio **migrano dall'anodo al catodo** attraverso l'elettrolita.
2. Gli elettroni, separati dagli ioni di litio, non possono attraversare l'elettrolita e quindi viaggiano attraverso un circuito esterno, generando corrente elettrica che alimenta il motore elettrico.
3. Il catodo accoglie gli ioni di litio che si intercalano nella sua struttura.

Questo processo genera un flusso di elettroni che fornisce energia al motore elettrico del veicolo.

## Fase di ricarica

Quando la batteria viene collegata a una fonte di energia esterna, come una stazione di ricarica:

1. La corrente elettrica applicata spinge gli elettroni dal catodo all'anodo.
2. Gli ioni di litio migrano attraverso l'elettrolita nella direzione opposta rispetto alla fase di scarica, spostandosi dal catodo all'anodo.
3. Gli ioni si reincorporano nella struttura dell'anodo, riportando la batteria allo stato carico.

La reazione chimica è inversa rispetto alla fase di scarica, permettendo il ripristino dell'energia immagazzinata nella batteria.

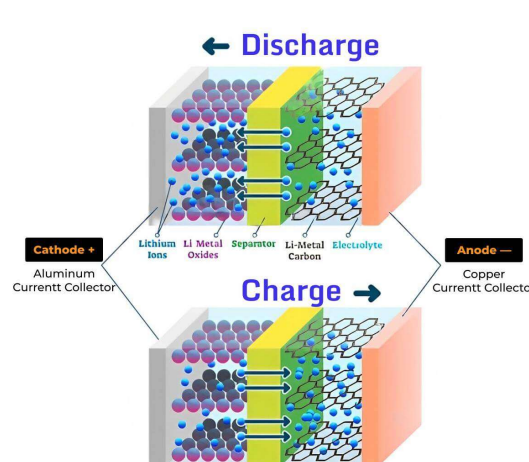


Figura 2 Carica e scarica di una Batteria agli ioni di litio [2]

## 2.2 Materiali e composizione chimica delle batterie

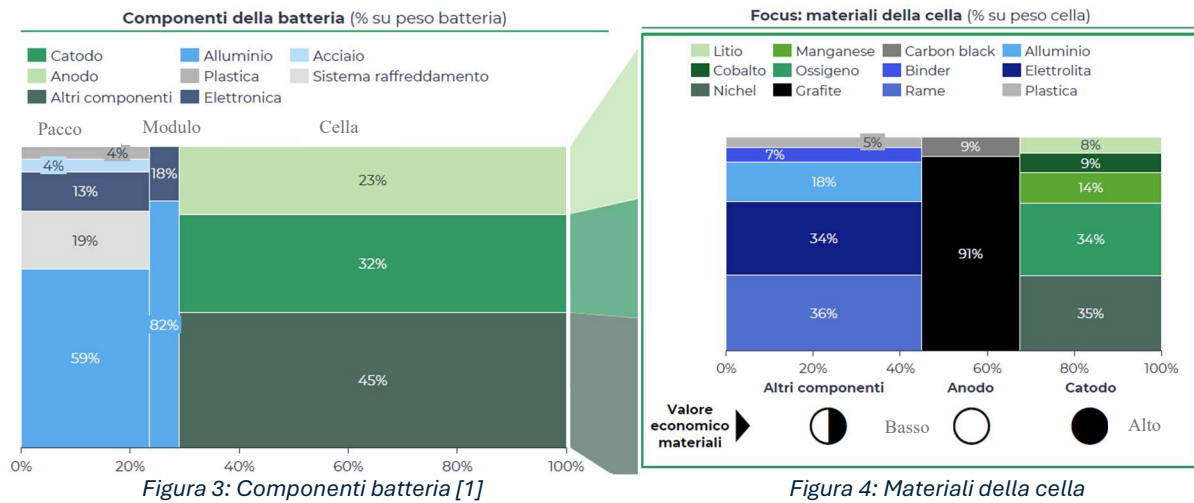


Figura 3: Componenti batteria [1]

Figura 4: Materiali della cella

Le batterie agli ioni di litio sono composte da diversi materiali, suddivisi tra il **pacco batteria**, **i moduli e le celle**, I componenti che rivestono un ruolo centrale nel funzionamento elettrochimico si trovano principalmente **catodo e nell'anodo**.

L'**anodo** è costituito principalmente da **grafite (91%)**, con una piccola percentuale di **binder (9%)** per stabilizzare la struttura. Il **catodo**, invece, è la parte della batteria con il maggior valore economico dei materiali ed è formato da una combinazione di  **nichel (35%)**, **cobalto (9%)**, **manganese (14%)**, **ossigeno (34%)** e **litio (8%)**. Questa composizione varia in base alla chimica specifica adottata, ad esempio NMC (Nichel-Manganese-Cobalto) o LFP (Litio-Ferro-Fosfato).

Oltre ai componenti attivi del catodo e dell'anodo, la batteria contiene **elettrolita (34%)**, essenziale per il trasporto degli ioni di litio tra i due elettrodi, e altri elementi come **rame (36%)**, **alluminio (18%)** e **plastica (5%)**, utilizzati per la struttura e la conduzione dell'energia.

A livello di pacco batteria, oltre alle celle, i materiali strutturali e di supporto rappresentano una parte significativa del peso, **59% alluminio**, utilizzato per la scocca e l'involucro, **19%** è costituito dal **sistema di raffreddamento**, essenziale per controllare la temperatura di esercizio, **13% elettronica**, tra cui i circuiti di gestione della batteria (BMS).

**4% plastica**, presente nei supporti e negli isolanti e **4% acciaio**.

Questa suddivisione evidenzia il valore strategico delle materie prime critiche come **nichel**, **cobalto e litio**, fondamentali per garantire elevate prestazioni e durata delle batterie nei veicoli elettrici [3].



## **2.3 Tecnologia e funzionamento nei veicoli e come ESS (energy storage system)**

Le batterie agli ioni di litio (LIB) rappresentano la tecnologia dominante sia per l'alimentazione dei veicoli elettrici (EV) sia per i sistemi di accumulo energetico (ESS). Tuttavia, la progettazione e le specifiche tecniche di queste due applicazioni differiscono notevolmente a causa dei diversi requisiti operativi e funzionali.

### **2.3.1 Specifiche tecniche di una batteria per veicoli elettrici (EV)**

Le batterie per auto elettriche sono progettate per garantire un'elevata densità energetica e potenza, al fine di offrire **autonomia sufficiente e prestazioni elevate**. Le principali specifiche includono [4]:

- **Densità energetica:** **150-250 Wh/kg** a livello di cella, fino a **180 Wh/kg** a livello di pacco.
- **Capacità del pacco batteria:** Generalmente tra **40 kWh e 100 kWh**, con modelli di fascia alta che superano i **120 kWh**.
- **Tensione nominale:** Varia da **350 V a oltre 800 V**, con sistemi a 800V utilizzati per migliorare l'efficienza di ricarica rapida.
- **Durata del ciclo di vita:** **1200-3000 cicli** di carica/scarica completi, equivalenti a circa **8-15 anni di utilizzo**.
- **Tempo di ricarica:** Dipende dalla potenza del caricatore:
  - **Corrente alternata (AC):** **6-12 ore** per una ricarica completa.
  - **Corrente continua (DC - Fast Charging):** **20-60 minuti** per l'80% della carica
- **Chimica delle celle più comuni:**
  - **NMC (Nichel-Manganese-Cobalto):** Equilibrio tra densità energetica e durata.
  - **NCA (Nichel-Cobalto-Alluminio):** Maggiore densità energetica, ma minore stabilità termica.

- **Gestione termica:** Raffreddamento a liquido o ad aria per mantenere temperature operative sicure.

### 2.3.2 Specifiche tecniche di una batteria per sistemi di accumulo energetico (ESS)

Le batterie per ESS sono ottimizzate per garantire una lunga durata e un'elevata efficienza di carica/scarica, con meno enfasi sulla densità energetica. Le principali specifiche includono:

- **Densità energetica:** **90-160 Wh/kg**, inferiore rispetto alle batterie EV per garantire maggiore sicurezza e durata.
- **Capacità del sistema:** Da pochi kWh per impianti domestici a **diversi MWh per sistemi industriali**.
- **Tensione nominale:** Generalmente tra **48V e 800V**, a seconda dell'applicazione.
- **Durata del ciclo di vita:** **3500-10.000 cicli**, progettate per operare per **15-25 anni**.
- **Tempo di ricarica:** Normalmente ottimizzato per ricariche graduali, evitando stress termici e degrado prematuro.
- **Chimica delle celle più comuni:**
  - **LFP (Litio-Ferro-Fosfato):** Maggiore sicurezza, durata più lunga e stabilità termica superiore.
  - **NMC a bassa percentuale di cobalto:** Utilizzato in applicazioni che richiedono un compromesso tra durata e densità energetica.
- **Gestione termica:** Solitamente meno sofisticata rispetto alle batterie EV, con raffreddamento passivo o ventilato

**La batteria per auto elettrica** ha come obiettivo principale quello di fornire energia a potenze elevate, per questo devono garantire un **elevata densità di potenza** al fine di rispondere rapidamente alle esigenze di accelerazione e frenata. Questo tipo d'impiego porta la batteria a degradarsi più rapidamente. Altro componente fondamentale all'interno di un pacco batteria, formato da più moduli, è il **Battery Management System (BMS)**, che regola il funzionamento dei vari componenti e ne coordina le funzioni, svolgendo un ruolo essenziale nel monitorare parametri critici come lo **State of Charge (SOC)**, la **temperatura**, lo **State of Health (SOH)** e **parametri di sicurezza**, assicurando un funzionamento ottimale anche in condizioni di alto stress termico e meccanico.

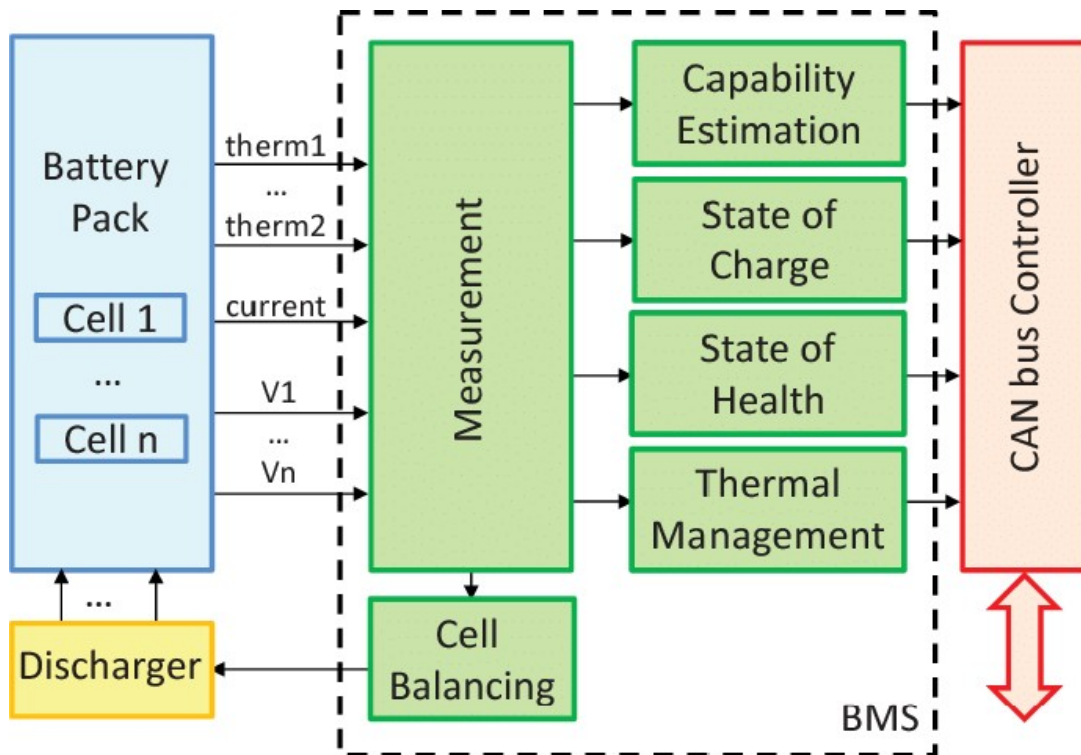


Figura 5: Diagramma a blocchi di un BMS

D'altra parte, la **batteria ESS** è progettata per immagazzinare e rilasciare energia in modo più graduale, con cicli di carica e scarica giornalieri più frequenti. La **densità energetica** in queste applicazioni **non è un fattore prioritario**, poiché questi sistemi non necessitano di essere compatti o leggeri, a differenza delle batterie EV. Operando in condizioni più stabili e a potenze più contenute la batteria ESS ha un ciclo di vita maggiore rispetto a quelle per EV.

## 2.4 Durata di vita e degrado delle batterie EV

La durata di vita delle batterie agli ioni di litio utilizzate nei veicoli elettrici è un parametro critico che influisce sulle prestazioni del veicolo e sui costi a lungo termine. La vita utile di una batteria EV viene generalmente misurata in **numero di cicli di carica e scarica** e in **durata del calendario**. Analizzando i dati precedenti possiamo calcolare la durata in anni stimata delle batterie per EV e per ESS come segue:

### Batterie EV

- Le batterie per veicoli elettrici hanno una vita utile compresa tra **1200 e 3000 cicli**.

- Un veicolo elettrico viene ricaricato in media **ogni 2-3 giorni**, quindi assumiamo una ricarica ogni **2,5 giorni**.

- Numero di cicli annuali:

$$365 \div 2.5 = 146 \text{ cicli/anno}$$

- Durata in anni:

$$1200 \div 146 = 8,2 \text{ anni (minimo)}$$

$$3000 \div 146 = 20,5 \text{ anni (massimo)}$$

Tuttavia, fattori come il degrado della batteria, l'efficienza ridotta e la necessità di sostituzione anticipata portano il valore massimo realistico a circa **15 anni**.

### Batterie ESS

- Le batterie per Energy Storage System hanno una vita utile tra **3500 e 10.000 cicli**.
- Questi sistemi vengono ricaricati **una volta al giorno**.
- Numero di cicli annuali:

$$365 \text{ cicli/anno}$$

- Durata in anni:

$$3500 \div 365 = 9,6 \text{ anni (minimo)}$$

$$10000 \div 365 = 27,4 \text{ anni (massimo)}$$

Tuttavia, per sicurezza, si considera un intervallo realistico di **15-25 anni**.

A determinare questa variabilità sulla vita utile e sul degrado della batteria sono diversi fattori, analizzati di seguito:

- **Fattori chimici**
  - **Crescita della SEI (Solid Electrolyte Interphase):** Formazione di uno strato isolante sull'anodo che riduce la capacità della batteria [5].
  - **Decomposizione dell'elettrolita:** La degradazione del liquido elettrolitico riduce la capacità di trasporto degli ioni [6]

- **Ossidazione e deposizione di litio metallico:** Può portare alla formazione di dendriti che compromettono la sicurezza della batteria [7]
- **Fattori elettrici**
  - **Profondità di scarica (DoD - Depth of Discharge):** Scariche profonde accelerano il degrado; quindi, è consigliato mantenere il livello di carica tra il 20% e l'80% [8].
  - **Cicli di carica e scarica:** Ogni batteria ha un numero massimo di cicli prima che la sua capacità si riduca significativamente [6].
  - **Corrente di carica elevata (fast charging):** Le ricariche rapide generano un maggiore stress sulle celle, riducendone la durata.
- **Fattori termici**
  - **Temperatura operativa elevata:** Un eccessivo riscaldamento accelera la degradazione chimica e riduce la capacità della batteria [6].
  - **Sbalzi termici:** Variazioni rapide di temperatura possono creare stress meccanico nei materiali della batteria.
- **Fattori ambientali, di utilizzo e gestione**
  - **Esposizione a temperature estreme:** Il freddo intenso riduce temporaneamente la capacità disponibile, mentre il caldo accelera il degrado [6].
  - **Lunghi periodi di inattività con batteria carica al 100%:** Se la batteria resta completamente carica per molto tempo senza utilizzo, subisce un deterioramento accelerato, si parla di **calendar life** [7].
  - **Algoritmi avanzati di gestione della carica e scarica:** I moderni sistemi BMS monitorano tensione, corrente e temperatura per ottimizzare la durata della batteria [7].
  - **Bilanciamento delle celle:** Garantire che tutte le celle si scarichino e si ricarichino uniformemente aiuta a prevenire guasti prematuri [8].

## 2.5 Normative e regolamentazioni sul riutilizzo delle batterie in Europa

Dalla Direttiva sul Quadro sui Rifiuti dell'Unione Europea (Direttiva 75/442/CEE), adottata nel 1975 e successivamente perfezionato e formalizzato con la Direttiva 2008/98/CE è stata introdotta la struttura del processo di gestione del rifiuto adottato oltre che dall'Unione Europea anche da agenzie ambientali internazionali come l'Environmental Protection Agency (EPA) degli Stati Uniti e l'United Nations Environment Programme (UNEP). Questo modello, che è possibile vedere in figura 6 prevede un approccio sistematico alla gestione del rifiuto, favorendo nell'ordine, la **prevenzione**, il **riuso**, il **riciclo**, il **recupero** e solo in ultimo lo **smaltimento**.



Figura 6: Waste management hierarchy [1]

Quando si parla di **prevenzione** nel caso specifico della batteria, si parla di adottare una serie di misure costruttive e comportamentali per fare in modo di ridurre la necessità di sostituzione della stessa. La prevenzione passa sicuramente dal miglioramento della chimica delle celle, aumentando i cicli di carica e scarica e **rallentare il degrado della batteria**. Fondamentale è il cercare di mantenere una carica della batteria compresa tra il 20 % e l'80%, così da evitare di stressare i cicli di carica e scarica. Bisogna cercare le condizioni favorevoli di utilizzo della batteria rispetto ai criteri elencati al paragrafo 2.2

Per ciò che concerne il **riuso**, oggetto principale di questo studio, si intende il cercare di trovare degli **impieghi alternativi** per la batteria che ha raggiunto un livello del 60 – 85 % della propria capacità iniziale. I benefici che derivano dall'applicare queste soluzioni sono molteplici e abbracciano diversi aspetti.

**Tra le opportunità di utilizzo di seconda vita troviamo:**

**Accumuli stazionari per le proprietà private:** Abbinato ad un impianto alimentato da fonti rinnovabili, questa soluzione permetterebbe di massimizzare l'energia raccolta in momenti di picco, per poi disporne nelle ore di buio, tutto ciò si traduce in una diminuzione di utilizzo dell'energia da rete, con risparmi in termini di costi e di impatto ambientale. Tale soluzione se implementata in larga scala porterebbe enormi benefici.

**Bilanciamento della rete:** Stabilizzare la rete elettrica per garantire una flessibilità nel dispacciamento energetico e sopperire ai picchi di domanda, riducendo la dipendenza da combustibili fossili.

**Migliore accesso all'energia:** In aree remote prive di connessione alla rete elettrica, queste batterie possono fornire energia stabile e affidabile, migliorando la qualità della vita e supportando la transizione energetica.

**Prevenzione di blackout:** Impiego per sistemi di backup dell'energia, al fine di garantire disponibilità in edifici ad alta densità energetica o in edifici in cui è essenziale avere una continuità dell'energia elettrica, come gli ospedali.

**Ricarica per veicoli elettrici:** Stoccaggio di energia per le colonnine di ricarica, accumulando nei periodi di bassa richiesta e contribuendo in caso di richiesta.

**Applicazioni alternative:** Applicazioni in mezzi di trasporto con minori esigenze prestazionali, come traghetti o carrelli elevatori

L'Unione Europea ha sviluppato una serie di normative per regolare il ciclo di vita delle batterie, con l'obiettivo di minimizzare l'impatto ambientale e ridurre la dipendenza dalle materie prime critiche. Il nuovo Regolamento sulle Batterie (EU Battery Regulation 2023/1542) [9], entrato in vigore nel 2023, sostituisce la Direttiva 2006/66/CE e introduce norme più stringenti per garantire una gestione sostenibile delle batterie in tutte le fasi del loro ciclo di vita

. Secondo il report sulla politica industriale dell'UE in materia di batterie [10] tra i punti più salienti troviamo:

- **Obiettivi di Efficienza e Recupero**
  - **Efficienza del riciclo:** almeno il **65% del peso medio** delle batterie agli ioni di litio dovrà essere riciclato entro la **fine del 2025**, con un aumento al **70% entro il 2030**.
  - **Recupero dei materiali critici:** entro il **2027**, gli impianti di riciclo dovranno garantire il recupero di almeno il **50% del litio**, il **90% del nichel** e il **90% del cobalto**. Queste percentuali saliranno entro il **2031** all'**80% per il litio** e al **95% per nichel e cobalto**.
  - **Contenuto minimo di materiali riciclati:** entro il **2031**, almeno il **6% del litio**, il **6% del nichel** e il **16% del cobalto** utilizzati nelle nuove batterie dovranno provenire da materiali riciclati. Questo requisito aumenterà entro il **2036** al **12% per il litio**, al **15% per il nichel** e al **26% per il cobalto**
- **Passaporto digitale della batteria:** tutte le batterie EV dovranno avere un passaporto digitale per garantire la tracciabilità lungo tutta la supply chain.

Parallelamente al regolamento sulle batterie, l'UE ha introdotto la Direttiva sulle Emissioni Industriali e il Regolamento sulle Materie Prime Critiche (Critical Raw Materials Act, 2023), che mirano a ridurre l'impatto ambientale del ciclo di produzione e smaltimento delle batterie e incentivare il recupero delle materie prime critiche per ridurre la dipendenza dai paesi extra-UE. L'Europa dipende in larga misura da Cina, Repubblica Democratica del Congo e Australia per il litio, il cobalto e il nichel

## **2.6 Second life delle batterie: Sfide e criticità del riciclo o riutilizzo**

Nonostante il quadro normativo europeo sia tra i più avanzati a livello globale, ci sono ancora criticità e sfide da affrontare per garantire e consolidare un sistema efficiente di riutilizzo e riciclo delle batterie. L'**assenza di standard** unificati per il riutilizzo delle batterie crea barriere commerciali all'interno del mercato unico europeo, limitando la possibilità di integrare facilmente batterie provenienti da diversi produttori in applicazioni secondarie. Inoltre, le **differenze nei design** e nelle tecnologie di gestione delle batterie rendono complessa la loro



standardizzazione, richiedendo processi di selezione e adattamento onerosi. A livello normativo, sebbene il passaporto digitale delle batterie, obbligatorio dal 2027, sia concepito per garantire la tracciabilità delle unità e dei materiali riciclati, la sua implementazione richiede **infrastrutture digitali avanzate** che non sono ancora completamente sviluppate in tutta Europa. Un'altra criticità riguarda l'**omologazione delle batterie di seconda vita** per applicazioni diverse dall'automotive, come lo stoccaggio di energia rinnovabile o l'uso in reti elettriche. Attualmente, non esistono linee guida armonizzate per la certificazione di queste batterie, rendendo difficile la loro integrazione in sistemi regolati. Dal punto di vista tecnico, la **variabilità** delle prestazioni delle batterie usate rappresenta una sfida significativa. Le condizioni delle celle possono differire notevolmente in base all'uso precedente, complicando la classificazione e il riutilizzo in nuovi contesti. Inoltre, i **costi elevati** della **raccolta** e del **trasporto** delle batterie esauste, classificate come rifiuti pericolosi, rappresentano un ostacolo economico alla creazione di un sistema di riutilizzo su larga scala. Per quanto riguarda il settore del riciclo anch'esso affronta problemi strutturali. La **scarsità di impianti** avanzati di riciclo in Europa costringe ancora l'UE a esportare una parte significativa delle batterie esauste verso paesi extraeuropei, aumentando i costi e riducendo l'efficienza della filiera circolare. Parallelamente, la dipendenza dell'Europa da fornitori esterni per materiali critici come litio, cobalto e nichel sottolinea l'importanza di sviluppare un sistema di riciclo efficiente.

### **3. Studio del problema**

#### **3.1 Approvvigionamento delle materie prime**

La domanda crescente di batterie per veicoli elettrici implica necessariamente un incremento significativo nell'estrazione e raffinazione di materie prime critiche come litio, cobalto e nichel. In particolare, la crescita delle vendite di auto elettriche rappresenta la principale causa dell'aumento della domanda globale di questi materiali. Nel 2023, la richiesta di litio per le batterie per veicoli elettrici ha raggiunto circa **140 mila tonnellate**, rappresentando l'85% della domanda totale globale, con un aumento superiore al 30% rispetto al 2022. Similmente, la domanda di **cobalto** per batterie ha raggiunto il **18%** del totale globale, mentre quella di **nichel** ha rappresentato oltre il **10%** della domanda complessiva del metallo, con un consumo di circa 370 mila tonnellate nel 2023, in aumento di quasi il 30% rispetto all'anno precedente.

Negli ultimi cinque anni, significativi investimenti nel settore minerario e nelle capacità di raffinazione hanno permesso di soddisfare pienamente la domanda attuale, generando persino un surplus produttivo. Nel 2023, infatti, l'offerta globale di litio ha superato la domanda del 10% [11].

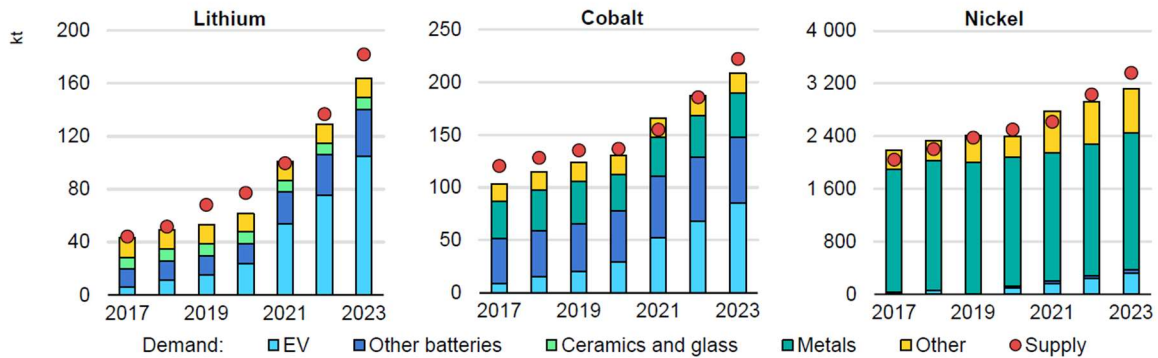


Figura 7: Domanda e offerta di materiali per le batterie EV [11]

### 3.1.1 La strategia Europea sui materiali critici

Attualmente non sono presenti siti estrattivi in Europa, ma sono almeno 3 i progetti promettenti, descritti all'interno del report ENEA denominato "il problema delle materie prime critiche" [12].

- **Litio in Portogallo:** È stata individuata una riserva significativa nella Mina do Barroso, nel nord-est del Paese, con una stima di 270.000 tonnellate di litio.
- **Litio in Finlandia:** Si prevede l'avvio dell'estrazione di litio nel 2024 in un sito minerario situato a 600 chilometri a nord di Helsinki.
- **Terre rare in Svezia:** È stato rivelato il più grande giacimento europeo di terre rare, nel Circolo Polare Artico.

Lo sviluppo di questi progetti comportano una serie di problematiche non indifferenti, come l'**Impatto ambientale e sociale** con la contaminazione dell'acqua e il consumo intensivo di risorse naturali, oltre a creare preoccupazioni da parte delle comunità locali, **tempi di sviluppo lunghi:** che possono superare i 10 anni a causa delle procedure autorizzative, valutazioni di impatto ambientale, e questioni burocratiche e politiche locali oppure **Incertezza economica e finanziaria** con l'instabilità dei prezzi dei metalli critici che potrebbe limitare l'attrattività economica di nuovi investimenti minerari e rallentare il processo di sviluppo.

Pertanto, ad oggi l'Europa resta fortemente dipendente da altri paesi e principalmente dalla Cina. Oltre all'estrazione diretta delle materie prime, la strategia europea prevede una **diversificazione delle fonti di approvvigionamento** mirando a ridurre la dipendenza da un

singolo fornitore dominante. Inoltre, si denota da parte dell'Europa il puntare fortemente ad **investimenti su tecnologie avanzate per il riciclo efficiente.**

### **3.2 Produzione delle batterie EV**

Nel 2023, le vendite mondiali di auto elettriche hanno spinto la domanda di batterie a superare i 750 GWh, registrando una crescita del 40% rispetto al 2022. Sebbene il ritmo di crescita sia lievemente rallentato rispetto al biennio precedente (2021-2022), la tendenza all'aumento rimane marcata e trainata principalmente dai veicoli elettrici (circa il 95% del totale).

La maggior parte della domanda globale attuale può essere soddisfatta tramite produzione nazionale o regionale nelle principali aree di mercato come Cina, Europa e Stati Uniti. Nel 2023, la produzione europea ha raggiunto circa 110 GWh, mentre gli Stati Uniti hanno prodotto circa 70 GWh. Tuttavia, nonostante questi aumenti produttivi, la dipendenza da importazioni rimane significativa, specialmente in Europa e negli Stati Uniti, dove rappresentano una quota rilevante delle batterie totali consumate, rispettivamente il 20 % e il 30%.

La Cina detiene un ruolo di leadership assoluta nella produzione di materiali attivi per batterie. Tale predominanza cinese rende più efficiente e integrata la sua supply chain rispetto a quella europea o americana. Si approfondirà nel capitolo successivo.

La capacità produttiva europea si attesta a 110 GWh nel 2023, con la produzione della maggior parte delle batterie per veicoli elettrici controllata da aziende non europee. Aziende coreane, ad esempio, detengono una capacità produttiva installata di oltre 350 GWh fuori dalla Corea, con impianti significativi in Europa. In particolare, la Polonia domina la produzione europea con circa il 60%, seguita dall'Ungheria con quasi il 30%. In termini aziendali, il ruolo predominante è giocato da LG Energy Solution, che ha stabilimenti chiave proprio in Polonia. Anche le aziende giapponesi hanno una presenza rilevante fuori dal Giappone, con una capacità produttiva totale di circa 57 GWh distribuiti soprattutto tra Europa e Stati Uniti.

Nel confronto con la Cina, emerge chiaramente la diversa struttura della supply chain: la Cina presenta una produzione interna ampiamente integrata, dominata da grandi aziende locali come CATL, BYD e Gotion, che insieme rappresentano quasi il 50% della capacità nazionale. Al contrario, la supply chain europea risulta fortemente dipendente da partnership e investimenti provenienti da imprese asiatiche, limitando così l'indipendenza strategica nella produzione di batterie e nell'approvvigionamento delle relative materie prime.

Questa situazione sottolinea l'urgenza per l'Europa di sviluppare ulteriormente la propria capacità produttiva locale, sia per garantire maggiore sicurezza strategica sia per rafforzare la competitività nel mercato globale delle batterie per veicoli elettrici.

### **3.3 Domanda di batterie EV in Europa e nel mondo, trend e progetti futuri**

La domanda globale di batterie e di minerali critici è in costante crescita, spinta principalmente dalla diffusione sempre più ampia dei veicoli elettrici (EV). Nel 2023, le vendite di veicoli elettrici hanno incrementato ulteriormente la domanda mondiale di batterie, consolidando un trend già in crescita da diversi anni. In particolare, la domanda di batterie per veicoli elettrici ha registrato il suo tasso di crescita più alto negli Stati Uniti ed Europa, con incrementi superiori al 40% rispetto all'anno precedente. Anche in Cina si osserva una crescita rilevante, benché leggermente inferiore rispetto a quella occidentale.

Questo aumento della domanda è stato trainato quasi totalmente dall'aumento delle vendite di veicoli elettrici, responsabili del 95% dell'incremento complessivo della domanda di batterie. Anche il segmento dei veicoli ibridi plug-in (PHEV) ha avuto un ruolo significativo sul mercato cinese, rappresentando circa un terzo delle vendite di auto elettriche e il 18% della domanda di batterie nel 2023, con un aumento rispetto agli anni precedenti. Un ulteriore sviluppo interessante nel mercato cinese riguarda l'aumento dei veicoli **EREV (Extended Range Electric Vehicle)**, che dispongono di una batteria significativamente più grande rispetto ai tradizionali PHEV, consentendo un'autonomia puramente elettrica di circa 150 km rispetto ai 65 km tipici dei PHEV tradizionali.

La crescente richiesta globale e regionale di batterie e materie prime critiche rende urgente affrontare le sfide legate all'approvvigionamento e alla gestione sostenibile delle risorse necessarie per supportare la transizione energetica e la mobilità elettrica in modo efficace e ambientalmente responsabile.

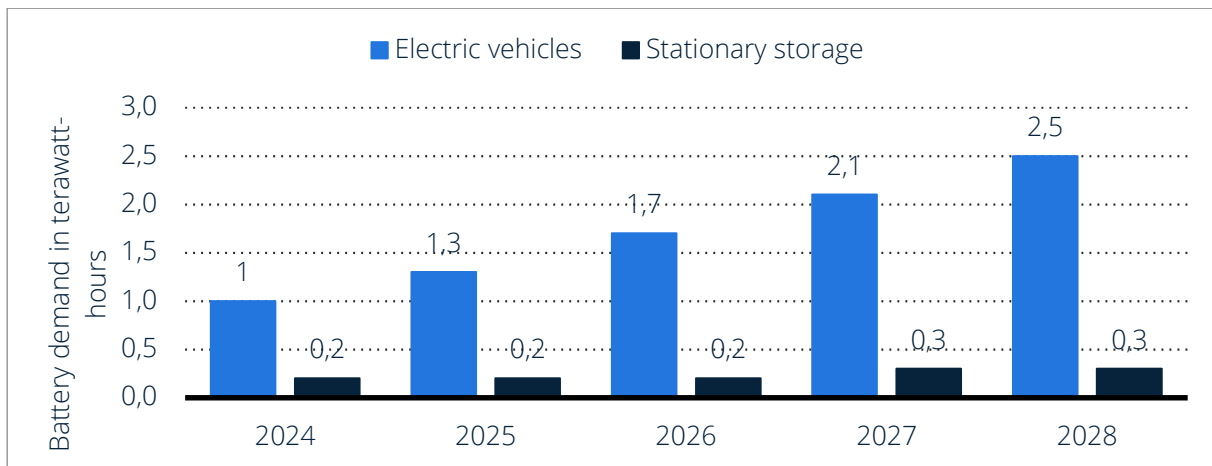


Figura 8: Worldwide; 2024; Excludes consumer electronics, includes battery EV and plug-in hybrid EV. Source(s): Bloomberg

In figura 8 è possibile osservare l'andamento della domanda di batterie agli ioni di litio dal 2024 al 2028, secondo una stima di Bloomberg potrebbe attestarsi nel 2028 a 2,8 TWh, nel 2030 le stime mostrate nel report Global EV Outlook 2024 [11] la domanda globale potrebbe raggiungere i 3,6 TWh con l'Europa che rappresenterà una parte significativa, circa 1000 GWh per veicoli elettrici e 600 GWh per applicazioni stazionarie. Questi dati e le analisi precedenti evidenziano la necessità di espandere la **capacità produttiva europea** in termini di produzione di nuove batterie, ma soprattutto in termini di riutilizzo e riciclo, per ridurre la dipendenza dai paesi extraeuropei, al fine di far fronte alla crescente richiesta, sia nel settore della **mobilità elettrica** che per i **sistemi energetici stazionari**. La figura 8 mostra la suddivisione della quota di capacità produttiva installata e annunciata di batterie per ogni regione in base ai paesi produttori. Quello che spicca da questo grafico è la predominante quota di capacità installata in Cina da aziende cinesi, con una quota di oltre il 90% a conferma dell'elevata integrazione verticale in questo settore, restano marginali le quote in mano a società di paesi non cinesi. Per quanto riguarda l'unione europea c'è una netta dominanza delle aziende Coreane come si osserva dalla figura 9, con una percentuale pari al 78%, il 13% è la quota di capacità installata da aziende Europee con un aumento annunciato che porterà questa quota al 27% entro il 2030, aumentando anche la presenza di aziende cinesi a discapito della quota di aziende Coreane. Per quanto riguarda il resto del mondo restano predominanti le aziende Coreane, ma è da notare anche la presenza di aziende Giapponesi.

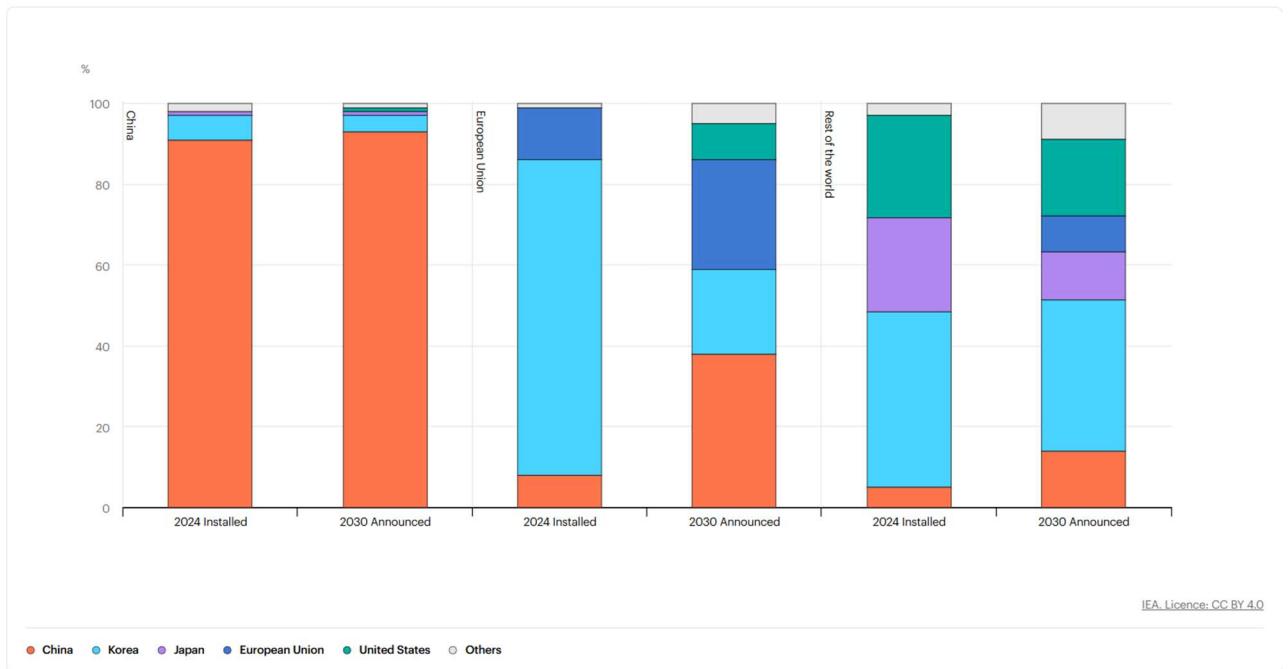


Figura 9: Quota di capacità produttiva di batterie per sede del produttore, 2024-2030 [9]

#### 4. La Supply chain delle batterie EV

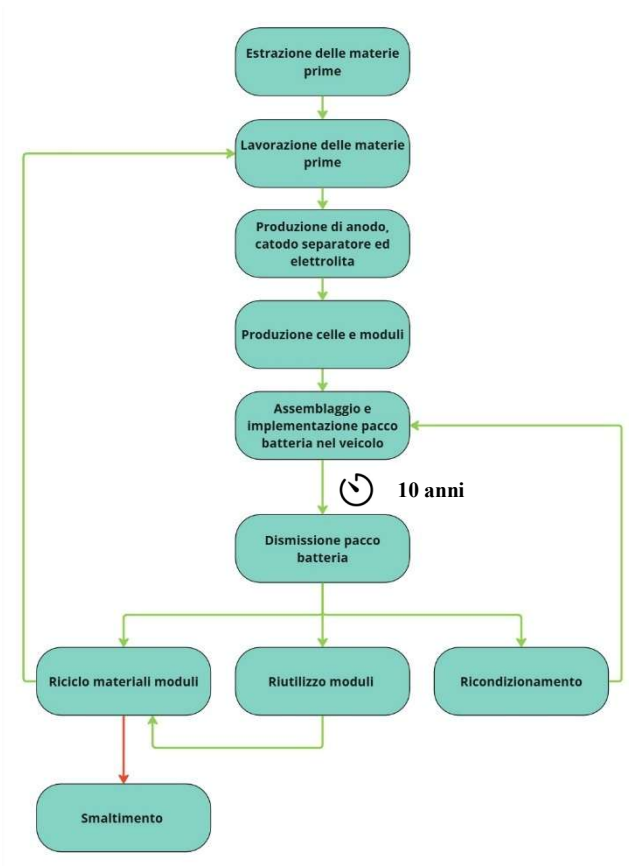


Figura 10: Intera supply chain delle batterie per EV

Lo schema riportato in figura 10 fa riferimento al processo produttivo di una batteria per EV lungo tutta la supply chain. La filiera inizia con l'**estrazione delle materie prime critiche**, seguita dalla loro **lavorazione** per ottenere materiali ad elevata purezza, necessari alla **produzione** di componenti essenziali quali **anodo, catodo, separatore ed elettrolita**. Questi componenti vengono poi assemblati per realizzare **celle e moduli**, che successivamente vengono integrati in **pacchi batteria** pronti per essere installati nei veicoli elettrici. Al termine della loro vita utile, i pacchi batteria vengono **dismessi**, aprendo così diverse possibili strade per la loro gestione: il **riciclo**, il **riutilizzo** o il **ricondizionamento**. Una

batteria dismessa che viene destinata al riciclo ha trascorso il suo ciclo di vita medio nell'auto in condizioni poco ottimali. Lo stress subito ha fatto sì che lo stato di salute (SOH) della batteria dismessa sia ridotto, motivo per cui la batteria viene destinata direttamente al riciclo. Una batteria riutilizzabile ha uno stato di salute intermedio compreso fra 60 – 85 % tale per cui può attraversare un secondo periodo di funzionamento, in condizioni di stress minore. Una batteria destinata al ricondizionamento è una batteria che durante la sua prima vita non ha subito una diminuzione significativa dello SOH > 85%, motivo per cui se opportunamente ricondizionata può essere riutilizzata nell'assemblaggio di un nuovo pacco batteria per veicoli elettrici. Completato il loro secondo ciclo di vita, le batterie riutilizzate vengono a sua volta riciclate, processo che consente il recupero di materiali critici, riducendo la necessità di nuove estrazioni. Soltanto le parti non ulteriormente valorizzabili vengono infine destinate allo smaltimento finale, minimizzando l'impatto ambientale della catena produttiva delle batterie.

## 4.1 Attori coinvolti nella filiera delle batterie usate

### 4.1.1 Estrazione, lavorazione e produzione

Il processo descritto al paragrafo precedente denota una moltitudine di attività che coinvolge diversi attori lungo tutta la supply chain. La fase di estrazione delle materie prime è svolta dalle **società minerarie** supportate e regolamentate dai **governi locali e nazionali** che concedono concessioni minerarie, gestione delle risorse naturali e autorizzazioni.

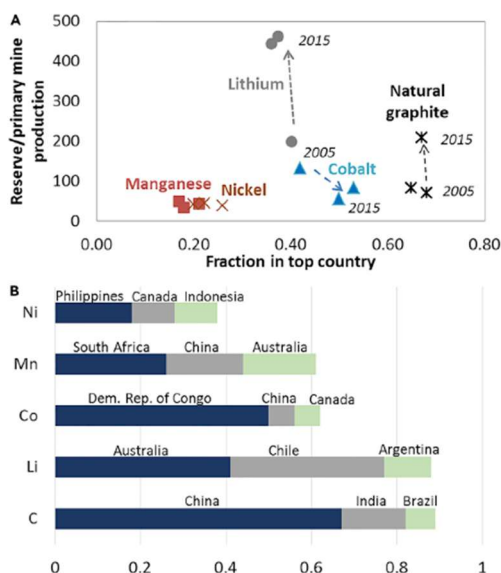


Figura 11: Risorse e paesi di provenienza [20]

La figura 11 riportata evidenzia la concentrazione della produzione delle materie prime fondamentali per la realizzazione di batterie per veicoli elettrici e il rapporto tra riserve minerarie e produzione primaria. Dalla parte superiore (grafico A) emerge chiaramente come il litio abbia riscontrato una crescita notevole sia in termini di riserve disponibili che di concentrazione geografica, con un notevole incremento tra il 2005 e il 2015. Grafite naturale e cobalto mostrano invece una significativa concentrazione produttiva nel paese principale, indicando

potenziali rischi geopolitici e di approvvigionamento. Nella parte inferiore (grafico B) vengono illustrati i principali paesi produttori per ciascuna materia prima: per il nichel spiccano

Indonesia, Canada e Filippine; il manganese è estratto principalmente in Australia, Cina e Sudafrica; il cobalto è dominato dalla Repubblica Democratica del Congo, seguita da Cina e Canada; il litio vede tra i principali produttori Australia, Cile e Argentina; infine, la grafite naturale è fortemente dominata dalla Cina, seguita da Brasile e India. Questa distribuzione geografica sottolinea la vulnerabilità della supply chain globale e suggerisce l'importanza strategica di diversificare le fonti di approvvigionamento per garantire stabilità e continuità produttiva nel settore delle batterie per EV.

La fase di lavorazione e raffinazione delle materie prime, è svolta da **aziende chimiche** che trasformano minerali grezzi in composti chimici ad alta purezza utilizzabili nelle batterie. Sono aziende supportate **dall'industria chimica e metallurgica** sia in termini di tecnologia che di processi per la raffinazione e purificazione. La produzione di componenti è svolta da **aziende specializzate** nella produzione di materiali elettrodici e componenti specifici per batterie, qui entrano in gioco anche i **laboratori di ricerca e sviluppo** come le università, centri di ricerca, startup che sviluppano nuovi materiali e tecnologie migliorative per batterie più performanti e sostenibili. La fase successiva coinvolge i **produttori di celle e moduli di batterie**, aziende che producono fisicamente le celle e le assemblano in moduli, dotate di impianti industriali che svolgono l'integrazione di tali componenti, pronte per applicazioni nell'automotive.

Dalla produzione della componentistica per batteria, fino alla produzione dei moduli, il paese principale resta la Cina che produce oltre tre quarti delle batterie vendute globalmente e nel 2024. Le batterie prodotte in Cina risultano oltre il 30% più economiche rispetto all'Europa e circa il 20% più economiche rispetto al Nord America. La riduzione dei prezzi delle batterie negli ultimi anni è una delle ragioni principali per cui molti veicoli elettrici (EV) in Cina sono ora più economici rispetto ai veicoli convenzionali.

Il significativo vantaggio competitivo acquisito dai produttori cinesi di batterie per veicoli elettrici è riconducibile principalmente a quattro elementi chiave. Innanzitutto, la Cina detiene una posizione dominante, avendo prodotto oltre il 70% delle batterie EV globali fino ad oggi, il che ha consentito alle aziende nazionali, come CATL e BYD, di accumulare competenze tecniche avanzate e ottimizzare continuamente i processi produttivi. Questa esperienza ha permesso di raggiungere **economie di scala superiori**, aumentando rapidamente e con maggiore efficienza la capacità produttiva. Inoltre, una **forte integrazione verticale della filiera**, ottenuta tramite acquisizioni strategiche e cooperazioni mirate tra aziende leader, ha ulteriormente favorito la riduzione dei costi e accelerato l'innovazione tecnologica, sostenuta anche da un accesso privilegiato a minerali critici a costi inferiori rispetto ai prezzi di mercato. Tale integrazione comprende tutte le fasi della catena di fornitura, dall'estrazione dei minerali



fino alla produzione finale delle batterie e dei veicoli stessi. Un terzo elemento riguarda la scelta strategica di focalizzarsi sulle batterie al litio-ferro-fosfato (LFP), meno costose delle tecnologie concorrenti e migliorate significativamente negli ultimi anni attraverso investimenti massicci in ricerca e sviluppo. Le batterie LFP ora occupano circa metà del mercato mondiale delle batterie EV e costano in media il 30% in meno rispetto alle batterie tradizionali con chimica NMC (litio-nichel-cobalto-manganese), pur garantendo prestazioni e autonomia competitiva. Infine, l'elevata concorrenza interna, caratterizzata dalla presenza di circa cento produttori nazionali, ha spinto molte aziende a ridurre i propri margini di profitto per proporre prezzi più aggressivi e mantenere o accrescere le proprie quote di mercato [11].

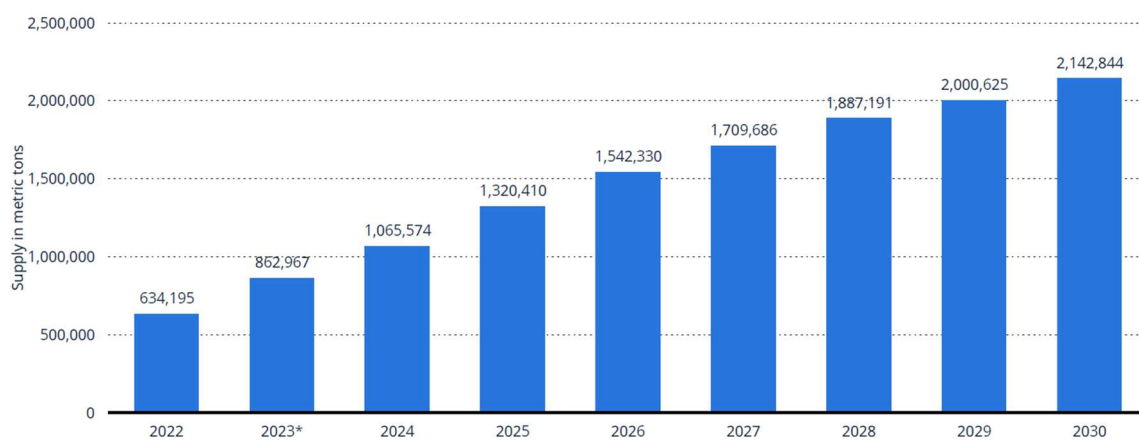


Figura 12: Proiezioni di fornitura globale di Litio 2023 - 2030 [13]

#### 4.1.2 Assemblaggio e implementazione nel veicolo

L'assemblaggio e implementazione del pacco batteria nel veicolo viene generalmente svolto direttamente dalle **case automobilistiche**, che integrano le batterie nei loro modelli di veicoli. Tra la produzione dei moduli e l'implementazione nei veicoli, è necessario una distribuzione efficiente e sicura, svolta da apposite **aziende che si occupano della logistica e trasporto** di materiali e sostanze pericolose.

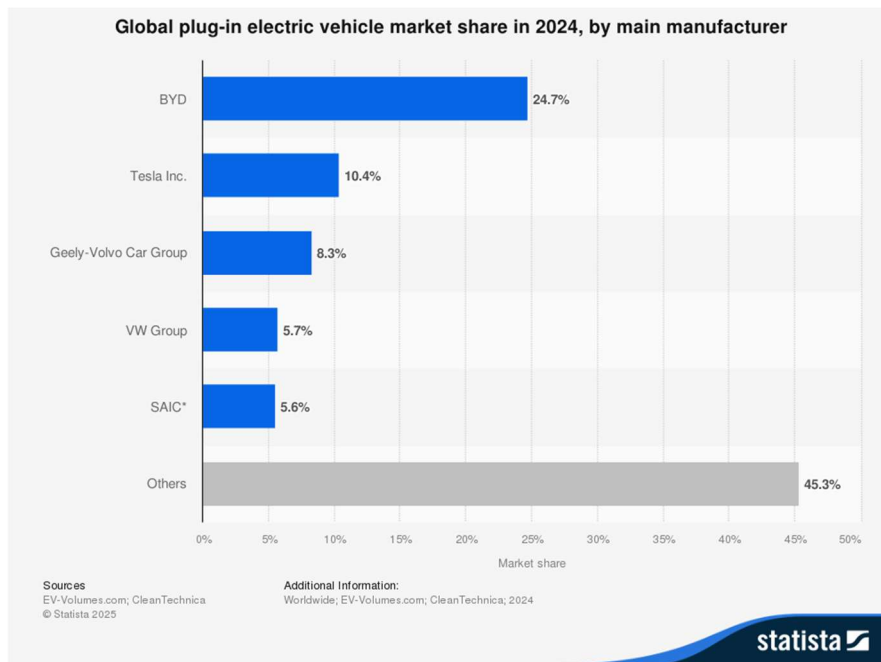


Figura 13: Market share delle principali case automobilistiche nel settore dell'elettrico nel 2024

In figura 13 è possibile osservare la classifica in termini di market share delle principali case automobilistiche nel settore dell'elettrico. La BYD è stata classificata come il principale produttore di veicoli elettrici a livello globale dopo aver venduto oltre quattro milioni di unità nel 2024, superando Tesla, che era stata leader nel settore l'anno precedente. Il volume di vendite di BYD si traduce in una quota di mercato di quasi un quarto del mercato globale. Tra i principali inseguitori si trovano Tesla e il gruppo Geely-Volvo Car.

Le immatricolazioni di veicoli elettrici plug-in sono aumentate nel 2023, con il mercato cinese dei veicoli elettrici in crescita del 36% su base annua. Esistono due tipi principali di veicoli elettrici plug-in: **i veicoli elettrici a batteria (BEV)** e **i veicoli ibridi plug-in (PHEV)**. Entrambi i tipi sono dotati di una presa di ricarica e di una batteria ricaricabile in grado di alimentare il veicolo in modo autonomo. Tuttavia, i PHEV dispongono anche di un motore a combustione interna tradizionale, che entra in funzione quando il livello della batteria è troppo basso. Di conseguenza, solo i BEV sono veicoli a zero emissioni.

Il mercato dei BEV è in continua crescita, con le vendite globali del 2023 più che raddoppiate rispetto ai livelli del 2021. [13]

### 4.1.3 Dismissione e riciclo

La fase di dismissione del pacco batteria è svolta da impianti specializzati nello smontaggio delle batterie oppure direttamente dalle case automobilistiche, che stanno entrando sempre più nel settore del riutilizzo, vedendo nella batteria dismessa una nuova risorsa. La fase di smaltimento è invece gestita da aziende specializzate nella gestione dei rifiuti pericolosi. Infine, le attività di riutilizzo e riciclo sono sottoposte alla supervisione delle agenzie regolatorie e delle autorità ambientali, sia locali che nazionali, che garantiscono il rispetto degli standard di sicurezza, qualità e sostenibilità ambientale, facendo applicare le normative in vigore.

I processi coinvolti nel riciclo delle batterie al litio prevedono una serie di fasi mirate al recupero e al riutilizzo dei materiali di valore, riducendo così la dipendenza da nuove attività estrattive e limitando l'impatto ambientale. Le tecniche di riciclo si suddividono generalmente in due categorie principali: processi chimici e processi fisici.

**Processi fisici:** includono operazioni di smontaggio, frantumazione e triturazione dei materiali delle batterie, sfruttando le diverse proprietà fisiche delle sostanze come densità, solubilità e magnetismo. Questo processo è cruciale per separare i componenti attivi della batteria dagli altri elementi, come elettroliti e collettori di corrente, migliorando l'efficienza del recupero dei materiali successivo.

**Processi chimici:**

- **Pirometallurgici:** si tratta di processi termici (800–1300°C) che fondono i metalli per recuperarli sotto forma di leghe di rame, cobalto, nichel e ferro, successivamente purificate per ottenere metalli ad alta purezza. Questo metodo presenta alcune limitazioni, tra cui l'elevato fabbisogno energetico e una minore flessibilità nel trattamento di differenti tipologie di batterie.
- **Idrometallurgici:** sfruttano la dissoluzione selettiva dei metalli tramite reazioni chimiche in soluzione acquosa, consentendo un recupero più efficiente e con un impatto ambientale ridotto. Questo processo è adatto alla produzione di materiali di alta qualità, riutilizzabili direttamente nella produzione di nuove batterie, ma richiede un rigoroso controllo dei rifiuti chimici generati.

Una tecnica alternativa emergente è il **direct recycling**, ovvero il riciclo diretto, che mira a recuperare direttamente i materiali attivi contenuti nelle batterie per riutilizzarli, evitando il passaggio intermedio della produzione della cosiddetta *black mass* — una miscela di materiali catodici e anodici che richiede ulteriori lavorazioni.

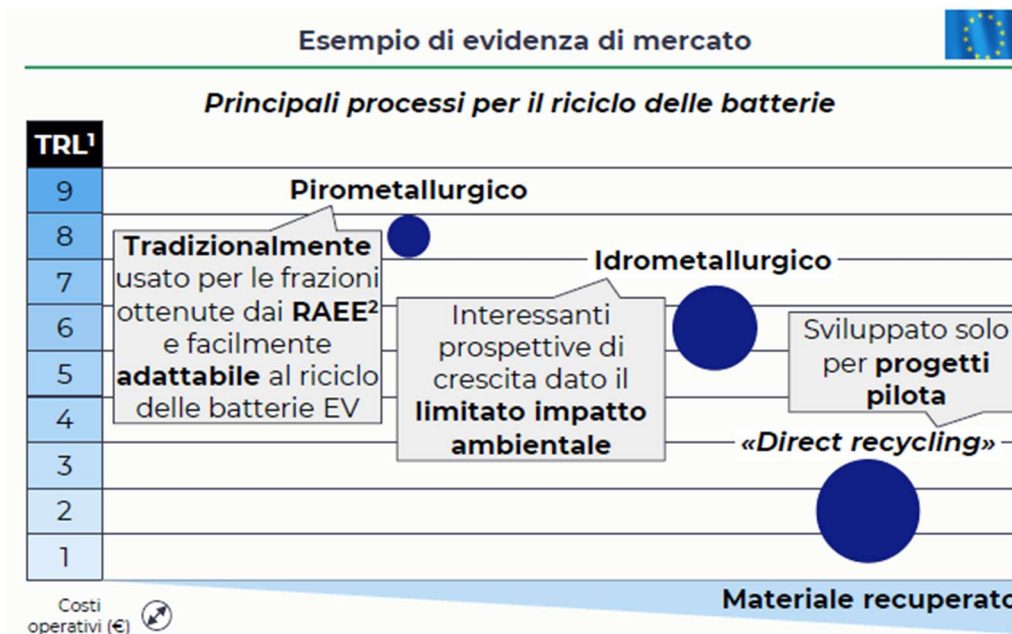


Figura 14: Technology Readiness Level tecniche di riciclo [1]

La Figura 14 mette a confronto le tecniche di riciclo descritte in precedenza utilizzando una scala TRL (Technology Readiness Level). Si tratta di una **scala di misurazione** usata per valutare **il grado di sviluppo di una tecnologia**, dalla fase iniziale di ricerca fino alla piena applicazione operativa.

Questa scala è composta da **9 livelli**, dove:

- **TRL 1:** si ha l'osservazione dei principi di base. È il punto di partenza, tipico della ricerca scientifica di base.
- **TRL 2:** formulazione del concetto tecnologico o applicazione.
- **TRL 3:** dimostrazione sperimentale del concetto (in laboratorio).
- **TRL 4:** validazione della tecnologia in ambiente controllato.
- **TRL 5:** validazione in ambiente simile a quello reale.
- **TRL 6:** dimostrazione in ambiente rilevante.
- **TRL 7:** prototipo dimostrato in ambiente operativo.

- **TRL 8:** sistema completo e qualificato.
- **TRL 9:** sistema provato con successo in ambiente reale (pronto per il mercato o l'uso operativo).

Inoltre, per ottimizzare il processo, si sta sviluppando un **design per il riciclo**, che prevede la progettazione delle batterie in modo da facilitare il loro smontaggio e recupero dei materiali. La tracciabilità delle celle, attraverso etichette digitali o sistemi RFID, è un altro elemento chiave per garantire un riciclo efficiente e sostenibile, consentendo di identificare rapidamente la composizione chimica e lo stato di salute delle batterie.

Ad oggi, diverse aziende stanno investendo nella creazione di impianti di riciclo avanzati per ridurre la dipendenza dalle materie prime vergini e limitare l'impatto ambientale dello smaltimento delle batterie esauste. **Hydrovolt**, una joint venture tra **Northvolt** e **Hydro**, ha avviato in Norvegia uno dei più grandi impianti europei per il riciclo delle batterie EV, con l'obiettivo di trattare fino a 300.000 tonnellate entro il 2030. Anche il **Gruppo Volkswagen**, attraverso il suo stabilimento di Salzgitter in Germania, ha sviluppato un processo che permette di recuperare oltre il 90% delle materie prime critiche, tra cui litio, cobalto e nichel. Un altro attore di rilievo è **Stena Recycling**, che opera a livello europeo offrendo servizi di raccolta, smistamento e riciclo delle batterie agli ioni di litio, con impianti certificati in più paesi.

L'Europa sta spingendo fortemente sul riciclo come elemento chiave della propria strategia industriale, per ridurre la dipendenza dalle importazioni di materie prime e garantire un approccio più sostenibile alla produzione di batterie. Attraverso il **Critical Raw Materials Act** e la **Battery Regulation**, l'Unione Europea ha fissato obiettivi ambiziosi per il recupero dei materiali contenuti nelle batterie esauste, incentivando gli investimenti in impianti di riciclo avanzati. L'obiettivo è non solo ridurre i rifiuti, ma anche creare una **supply chain più resiliente e autonoma** rispetto ai competitor asiatici e americani.

In Italia, stanno emergendo iniziative importanti nel settore del riciclo delle batterie. **Enel X**, in collaborazione con **MIDAC**, ha lanciato un progetto per il primo grande impianto italiano di riciclo delle batterie al litio, con l'obiettivo di recuperare materie prime critiche e riutilizzarle nella produzione di nuove celle [14]. **Comau**, azienda italiana specializzata in automazione industriale, sta sviluppando tecnologie innovative per migliorare l'efficienza del processo di riciclo, contribuendo alla transizione verso un modello di economia circolare nel settore delle

batterie [15]. Un'altra iniziativa interessante è quella di **E-Gap Engineering** [16], che sta sperimentando soluzioni basate sul riutilizzo delle batterie di seconda vita, impiegandole per sistemi di accumulo mobili e applicazioni energetiche stazionarie.

Queste iniziative dimostrano che l'Europa, sta investendo sempre più nel settore del riciclo delle batterie, riconoscendone il ruolo strategico per la sostenibilità ambientale e la sicurezza industriale.

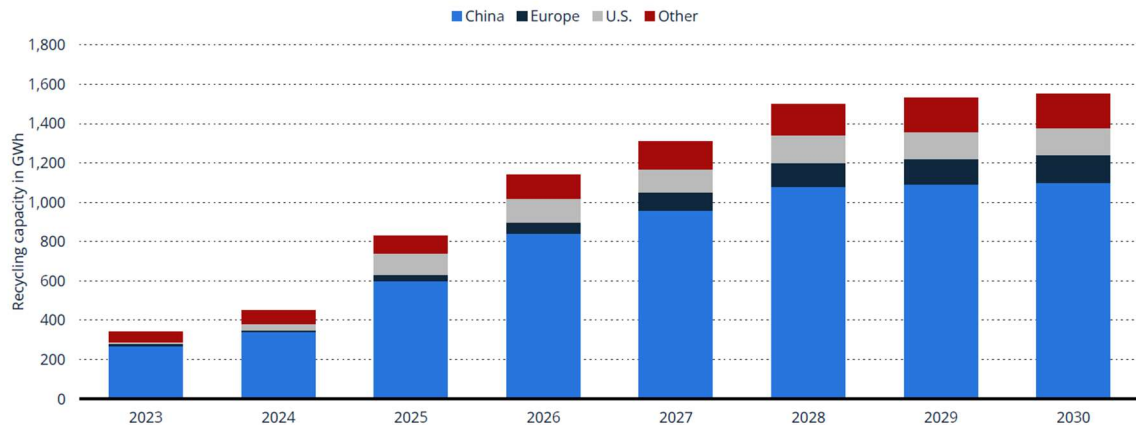


Figura 15: Capacità di riciclo di batterie mondiale 2023-2030, per regione [13]

## 4.2 Processo di selezione e testing delle batterie dismesse

Una delle principali problematiche nella gestione della fase di fine vita dei moduli batteria è la stima accurata e rapida del loro **state of health (SOH)**, ovvero della capacità residua rispetto al valore nominale di una batteria nuova. I metodi più comuni per stimare lo SOH possono essere generalmente suddivisi in due categorie principali: **metodi basati sull'impedenza** e **metodi basati sulla capacità**. Tra i primi, la Spettroscopia di Impedenza Elettrochimica (EIS) si distingue per essere una tecnica precisa e veloce, in grado di analizzare la risposta in frequenza della batteria. Tuttavia, l'applicazione su larga scala dell'EIS risulta complessa e costosa, e i risultati sono influenzati dalla temperatura e dallo stato di carica (SOC), rendendola poco adatta ad ambienti industriali in cui è necessario eseguire una rapida selezione dei moduli. I metodi basati sulla capacità, come l'Incremental Capacity Analysis (ICA) o i test di scarica completa, sono più semplici da implementare e richiedono strumentazione meno costosa. Tuttavia, i test di scarica completa sono molto dispendiosi in termini di tempo e possono risultare impraticabili quando si devono analizzare centinaia di moduli. Per superare questo ostacolo, studi recenti hanno proposto l'utilizzo del test di Capacità da Scarica Parziale (PDC) come metodo aggiuntivo.

Tra le tecniche più recenti, si distingue il Partial Discharge Test (PDT), che consente di stimare rapidamente la capacità residua di un modulo senza dover eseguire cicli completi di carica e scarica, permettendo così un risparmio sia in termini di tempo che di costi operativi. La metodologia di test si basa sull'Incremental Capacity Analysis (ICA), una tecnica che analizza la derivata della capacità in funzione della tensione e identifica caratteristiche nella curva di scarica indicative dello stato della batteria. È stato dimostrato che il test può essere eseguito a diversi livelli di SOC, utilizzando solo una porzione del range operativo della batteria. Nel lavoro citato [17], i valori misurati sono stati confrontati con le previsioni teoriche e con i risultati di cicli di scarica completi, mostrando uno scostamento massimo inferiore al 5%, a conferma dell'elevata affidabilità del metodo. L'applicazione dell'ICA ai dati di scarica parziale ha inoltre permesso di identificare intervalli di tensione particolarmente informativi, riducendo i tempi di test senza compromettere l'accuratezza della stima.

Uno dei vantaggi più rilevanti di questa strategia è la sua scalabilità industriale. Le aziende che si occupano della selezione di batterie a fine vita necessitano di protocolli di test rapidi per classificare i moduli da destinare al riciclo o al riutilizzo. L'adozione del PDT semplifica questa fase, migliorando la selezione dei moduli riutilizzabili per applicazioni di seconda vita, come i sistemi di accumulo stazionari. Inoltre, evitando i cicli completi di scarica, si riduce lo stress sulle celle, preservandone la stabilità chimica durante la fase di valutazione.

Questa metodologia potrebbe dunque giocare un ruolo chiave nella transizione verso un'economia della batteria più sostenibile, semplificando il processo di selezione e riducendo l'impatto ambientale delle batterie a fine vita.

## **5. Modellazione supply chain con Vensim (approccio System Dynamics)**

### **5.1 Introduzione alla metodologia System Dynamics**

La **System Dynamics** (SD) è una metodologia di modellazione e simulazione che consente di rappresentare e analizzare il comportamento di sistemi complessi e dinamici nel tempo, in presenza di interazioni non lineari, ritardi temporali e meccanismi di retroazione. Introdotta da Jay W. Forrester al MIT negli anni '60, questa tecnica si basa sulla costruzione di modelli concettuali e matematici composti da livelli (stock), flussi, variabili ausiliarie e anelli di retroazione (feedback loops), elementi essenziali per studiare fenomeni dinamici complessi in ambito economico, industriale, sociale e ambientale.

Uno degli strumenti più utilizzati per implementare modelli SD è **Vensim**, un software sviluppato da Ventana Systems che permette di costruire diagrammi causali, definire equazioni

tra variabili, assegnare unità di misura e simulare il comportamento del sistema nel tempo. La simulazione avviene tramite integrazione numerica, restituendo l'evoluzione delle variabili chiave in funzione delle condizioni iniziali e dei parametri scelti.

L'utilizzo dell'approccio System Dynamics combinato con Vensim risulta particolarmente efficace per rappresentare i meccanismi di accumulo, saturazione e feedback che caratterizzano molti sistemi reali. Inoltre, la possibilità di eseguire analisi di scenari e simulazioni rende questa metodologia uno strumento prezioso per supportare decisioni strategiche e valutare l'impatto di politiche nel lungo periodo. [18]

## 5.2 Strutturazione del modello: variabili chiave e relazioni

Il modello sviluppato, visibile in figura 16 descrive l'intera filiera delle batterie per veicoli elettrici, dalla produzione iniziale all'estrazione delle materie prime, fino alla dismissione e al potenziale riutilizzo o riciclo. Lo scopo del modello verte a:

- stimare la quantità di batterie dismesse in relazione alla domanda di auto elettriche
- verificare come potrebbe cambiare la supply chain in relazione alla diminuzione di quantità di materie prime importate e alla nascita di eventuali siti di estrazione europei e congiuntamente al crescere della disponibilità di materiali di riciclo.
- Valutare la disponibilità di batterie da riutilizzare in seconda vita.

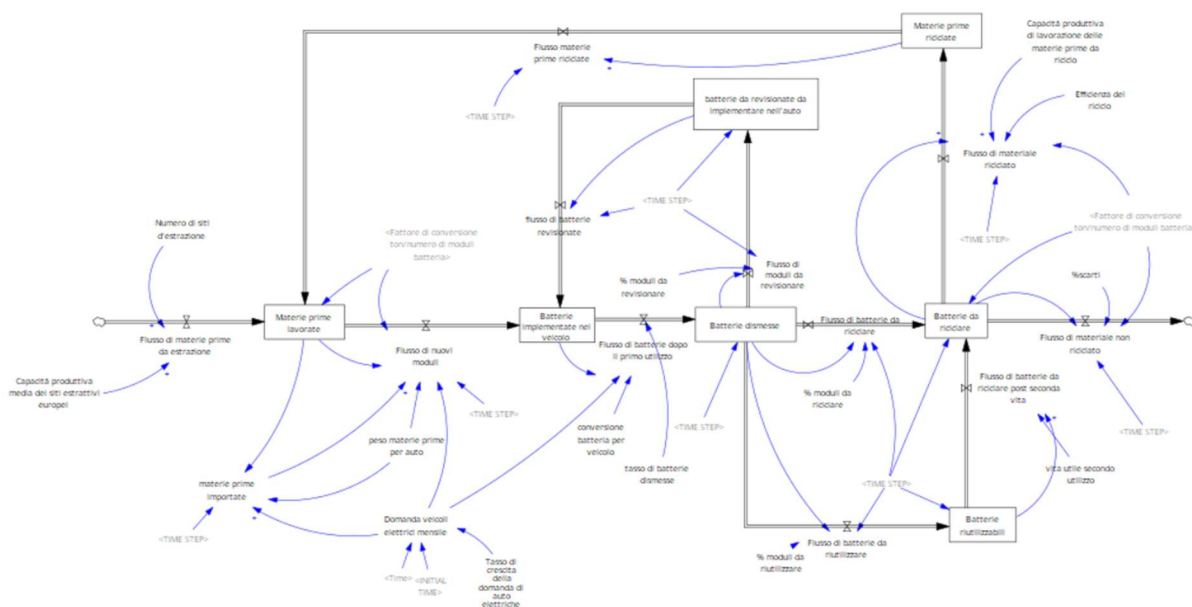


Figura 16: Modello grafico Vensim

L'intervallo temporale del modello va dall'anno **2023 – 2040 (dal mese 0 al mese 204)** con unità di tempo **mese** e **timestep 1**.



La struttura consiste nell'individuare un serie di stock, flussi, variabili e parametri messi in relazione tra loro definendo causalità e correlazioni. Il modello fa riferimento alla supply chain Europea, partendo da sinistra avremo:

- **Stock di materie prime lavorate:** Questo stock contiene le materie prime dopo il processo di raffinazione, pronte per essere usate nella costruzione di anodo catodo, elettrolita e separatore ovvero la componentistica utile alla costruzione della batteria. Lo stock di materie prime lavorate è alimentato dai **flussi di materie prime estratte**, e dal **flusso di materiale riciclato**, tutto il resto delle materie prime mancanti per soddisfare la domanda di nuove batterie verrà importato. Per stimare le quantità di materiale presente mediamente in un'auto elettrica è stato fatto uno studio sui modelli auto più venduti per i segmenti City car (A), Compatte (C), Berlina media (D), SUV (E). Si riportano in tabella in figura 18 i valori di capacità, peso del pacco batteria, rapporto tra peso e capacità ed autonomia, nelle celle evidenziate in azzurro sono riportate le medie dei valori. Per ricavare la percentuale per ogni materia prima si fa riferimento alla figura 17 che riporta tutti i materiali e la quantità in peso in un pacco batteria da 400kg.



Figura 17: Peso di ogni materiale in un pacco batterie

Segmento	Capacità (kWh)	Peso pacco batteria (kg)	rapporto peso capacità (kg/kWh)	Autonomia (km)
City car (A)	24	170	7,08	180
Compatte (C)	58	380	6,6	330
Berlina media (D)	75	500	6,7	614
SUV (E)	81	550	6,8	590
	60	400	6,77	428,5

Figura 18: Calcolo del rapporto tra capacità e peso e valori medi

- Stock di Batterie implementate nell'auto:** Questo stock fa riferimento alla quantità di pacchi batteria di nuova costruzione da implementare nell'auto ed è alimentato dal **flusso di nuove batterie** che a sua volta è creato a partire dalle quantità di componenti per batteria prodotti in Europa sommati ai componenti di importazione. Lo stock è calcolato a partire dalla stima di domanda di auto elettriche in Europa.
- Stock di batterie dismesse:** Come descritto nei capitoli precedenti, la dismissione di un pacco batterie avviene dopo circa 10 anni di utilizzo, per stimare una quantità mensile di batterie dismesse si è fatto riferimento ad un tasso di dismissione in funzione della stima di pacchi batteria dismessi mensilmente. Lo stock è alimentato dal **flusso di batterie dopo il primo utilizzo**. In uscita si trovano **flusso di batterie da riciclare** **flusso di batterie da riutilizzare** e **flusso di batterie da revisionare** si ipotizzato che lo stato di salute (SOH) delle batterie dismesse fosse:
  - **SOH <60% nel 20% dei casi**
  - **60<SOH<85% nel 70% dei casi**
  - **SOH >85% nel 10% dei casi**
- Stock di batterie da riciclare:** Questo stock è alimentato dal **flusso di batterie da riciclare**. Lo stock avrà in uscita due flussi uno che fa riferimento alla quantità di materie prime che è possibile riciclare "**Flusso di materie prime da riciclare**" (tasso di riciclo 80%) ed uno che fa riferimento alla quantità di materie prime di scarto "**Flusso di materie prime di scarto**" (tasso di scarto 20%), che verranno smaltite.
- Stock di batterie riutilizzabili:** Questo stock è alimentato dal **flusso di batterie da riciclare**. Lo stock di batterie riutilizzabili avrà in uscita il **Flusso di batterie da riciclare post seconda** che contribuirà ad alimentare ulteriormente lo stock di batterie da riciclare.

- **Stock di batterie da revisionare:** Questo stock è alimentato dal **flusso di batterie da riciclare**. Lo stock avrà in uscita il “**flusso di batterie revisionate**” che andranno ad alimentare lo stock di batterie da implementare nell’auto.
- **Stock di materiale riciclato:** Questo stock contiene le materie prime provenienti dal processo di riciclo alimentato **dal flusso di materiale riciclato e che tramite il “Flusso materie prime riciclate”** andranno ad alimentare a sua volta lo stock di materie prime lavorate.

Di seguito si mostrano in tabella 1 le funzioni inserite nei rispettivi stock, flussi e variabili del modello, corredate da unità di misura e commento sulla motivazione di tali valori e funzioni.

Tabella 1: Variabili modello Vensim

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Capacità produttiva media dei siti estrattivi europei	Parametro	da 0 a 250		ton/month	<p>Capacità produttiva media di 2 tonnellate di litio al mese. Calcolata dalla media di produzione dei progetti in sviluppo in europa. In rapporto al peso totale di un pacco batteria, dove il litio costituisce circa il 2% . La variabile è impostata in modo tale da avere una capacità produttiva nulla al tempo 0 nel per poi salire fino a 250 ton nel 2040, rappresentant e il peso di materie prime in rapporto al litio per un pacco batteria da 400 kg</p>

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Numero di siti d'estrazione	Parametro	da 0 a 20		Adimensionale	<p>Secondo un rapporto della Federazione Europea dei Trasporti e dell'Ambiente (T&amp;E), l'Unione Europea può ridurre la propria dipendenza dalle importazioni di litio con 28 progetti di estrazione, raffinazione e integrazione in corso, soddisfacendo così il 53% della domanda di produzione estratta entro il 2030. Nel modello è stato considerato la buona riuscita di 20 progetti realizzati tra il 2023 e il 2040</p>

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Flusso di materie prime da estrazione	Flusso	$\text{MAX}(0, \text{Capacità produttiva media dei siti estrattivi europei} * \text{Numero di siti d'estrazione})$		ton/month	
Materie prime lavorate	Stock	$\text{MIN}(\text{Flusso di materie prime da estrazione} + \text{Flusso materie prime riciclate}, \text{Flusso di nuovi moduli} * \text{"Fattore di conversione ton/numero di moduli batteria"})$		ton	Creazione dei componenti costituenti un modulo batteria. Anodo Catodo, dielettrico ed elettrolita. Questo stock sarà alimentato dall'afflusso di materie prime da estrazione e materie prime provenienti dal riciclo

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Materie prime importate	Variabile	MAX(0, Domanda veicoli elettrici mensile*peso materie prime per auto-Materie prime lavorate/TIME STEP)		ton/month	<p>Produzione europea 75 GWh nel 2023.</p> <p>Nel modello vensim la produzione europea proviene dalle materie prime lavorate che si intendono quelle lavorate sulla base di quanto da noi estratto. Tutto quello che non viene prodotto internamente dovrà provenire da fornitori esterni</p>

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Domanda veicoli elettrici mensile	Variabile	$(1.136e+07/12)^* \exp(\text{Tasso di crescita della domanda di auto elettriche} * (\text{Time} - \text{INITIAL TIME}))$		veicolo/month	3.26 Milioni di auto elettriche vendute nel 2024 (eletttriche + plug in) 8.1 Milioni di auto elettriche circolanti in europa al 2023. Quindi partendo dallo stock di macchine presenti si ipotizza un tasso di crescita della domanda mensile
Peso materie prime per auto	Parametro	0.4		ton/veicolo	Considero che un pacco batteria da 60 kWh (che è la capacità media considerata) pesa circa 400kg



Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Tasso di crescita della domanda	Variabile	$(1+0.1)^{(1/12)}-1$		veicolo/month	Tasso di crescita mensile ipotizzando un tasso di crescita annuale del 10%
Fattore di conversione ton/numero di moduli batteria	Parametro	0,4		ton/modulo	1 pacco batteria pesa in media 400 kg quindi 0.4 ton, ed ha una capacità media di 60 KWh

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Batterie implementate nel veicolo	Stock	flusso di moduli revisionati+Flusso di nuovi moduli-Flusso di moduli dopo il primo utilizzo	8.1*10 <sup>6</sup>	Modulo	batterie funzionanti nell'auto, considerando 8,1 M auto elettriche circolanti in europa nel 2023 e una crescita in base alla domanda di auto

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Flusso di moduli dopo il primo utilizzo	Flusso	$\text{MAX}(0, \text{MIN}(\text{Domanda veicoli elettrici mensile} * \text{conversione batteria per veicolo}, \text{Batterie implementate nel veicolo} * \text{tasso di batterie dismesse}))$		modulo/month	360000 kWh capacità di batterie dismesse nel 2023 e 60 sono i kWh di capacità medi per auto, quindi facendo $360000/60$ si ottengono i pacchi batteria dismessi
Tasso di batterie dismesse	Parametro	0,15		Fraction/month	Il tasso di dismissione delle batterie è fissato a 0.15 in tutto l'arco temporale

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Batterie dismessi	Stock	Flusso di batterie dopo il primo utilizzo- MIN(Batterie dismesse/TIME STEP, Flusso di batterie da riciclare + Flusso di batterie da riutilizzare + Flusso di moduli da revisionare)	0	modulo	Si intendono le batterie dismesse dalle auto dopo 10 anni di utilizzo. Queste batterie verranno testate ricavando uno SOH, per decidere se reimpiegarle e in quale campo, se essere riciclate, riutilizzate oppure revisionate per usarle nelle auto
% Moduli da revisionare	Parametro	0,1		Fraction	Tutti i moduli sopra l'85% di SOH andranno revisionati

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
% Moduli da riutilizzare	Parametro	0,7		Fraction	Tutti i moduli tra il 60% e l'85% di SOH andranno riutilizzati
% Moduli da riciclare	Parametro	0,2		Fraction	Tutti i moduli sotto il 60% di SOH andranno riciclati
Flusso di batterie da riciclare	Flusso	$\text{MAX}(0, \text{Batterie dismesse} * \% \text{ moduli da riciclare} / \text{TIME STEP})$		modulo/month	
Flusso di batterie da riutilizzare	Flusso	$\text{MAX}(0, \text{Batterie dismesse} * \% \text{ moduli da riutilizzare} / \text{TIME STEP})$		modulo/month	

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Flusso di batterie da revisionare	Flusso	$\text{MAX}(0, \text{Batterie dismesse} * \% \text{ moduli da revisionare} / \text{TIME STEP})$		modulo/month	
Batterie da revisionate da implementare nell'auto	Stock	Flusso di moduli da revisionare-flusso di moduli revisionati	0	Modulo	Lo stock è costituito dalle batterie con $\text{SOH} > 85\%$ , e sono le batterie che una volta revisionate torneranno ad essere riutilizzate nell'auto, non avendo subito una degradazione rilevante

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Batterie da riciclare	Stock	Flusso di batterie da riciclare+ Flusso di batterie da riciclare post seconda vita- MIN(Batterie da riciclare/TIME STEP, (Flusso di materiale non riciclato + Flusso di materiale riciclato) / "Fattore di conversione ton/numero di moduli batteria"	0	Modulo	Stock costituito da batterie risultanti avere un SOH < 60% per cui non è possibile riutilizzarle, andando direttamente alla fase di riciclo

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Batterie riutilizzabili	Stock	Flusso di batterie da riutilizzare- MIN(Batterie riutilizzabili/TIME STEP, Flusso di batterie da riciclare post seconda vita)	0	Modulo	Le batterie riutilizzabili possono essere reimpiegate come moduli nei sistemi di accumulo residenziali oppure come moduli per stabilizzare la rete. Le batterie in questione devono essere sottoposte a attività testing che ne certificano la qualità e devono avere un SOH compreso tra 60 e 85%
Flusso di batterie revisionate	Flusso	batterie da revisionate da implementare nell'auto/TIME STEP		modulo/month	
Vita utile secondo utilizzo	Parametro	7*12		month	7 anni l'utilizzo medio per la seconda vita



Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Flusso di batterie da riciclare post seconda vita	Flusso	MAX(0, Batterie riutilizzabili/vita utile secondo utilizzo)		modulo/month	
Flusso di materiale riciclato	Flusso	MAX(0, MIN(Capacità produttiva di lavorazione delle materie prime da riciclo,(Batterie da riciclare*Efficienza del riciclo*"Fattore di conversione ton/numero di moduli batteria" )/TIME STEP))		ton/month	Dipenderà dall'efficienza del riciclo 70% entro il 2030. Efficienza del recupero dei materiali 80% per il litio

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Flusso di materiale non riciclato	Flusso	$\text{MAX}(0, \text{Batterie da riciclare} * \% \text{scarti} * \text{Fattore di conversione ton/numero di moduli batteria} / \text{TIME STEP})$		ton/month	
%scarti	Parametro	0,2		fraction	considero il 20% di scarto
Efficienza del riciclo	Parametro	0,8		fraction	considero l'80% di materiale riciclato
Capacità produttiva di lavorazione delle materie prime da riciclo	Parametro	1000000		ton/month	

Nome variabile	Tipo	Funzione	Valore iniziale	Unità	Commento
Flusso di materiale riciclato-Flusso materie prime riciclate	stock	Flusso di materiale riciclato-Flusso materie prime riciclate	0	ton	materie prime riciclate pronte per essere reinsirate nel ciclo di costruzione di nuove batterie
Flusso materie prime riciclate	Flusso	$\text{MAX}(0, \text{Materie prime riciclate} / \text{TIME STEP})$		ton/month	
Timestep	Parametro	1		month	
INITIAL TIME	Parametro	0		month	Anno 2023 corrispondente al mese 0
FINAL TIME	Parametro	204		month	Anno 2040 corrispondente al mese 204

### 5.3 Stima della domanda di batterie di accumulo per il settore residenziale in Europa

Secondo la stima di Eurostat, si stimano **220 milioni di abitazioni in Europa**, dato ottenuto dalla media europea di 506 abitazioni ogni 1.000 abitanti per il 52% in case unifamiliari e la restante parte in appartamenti [19]. Considerando che un sistema di accumulo in abitazione debba essere abbinato ad un sistema fotovoltaico si è considerato un tasso di penetrazione (PFV) crescente da 0,12 a 0,2 e un tasso di adozione per l'adozione di sistemi di accumulo (PB) compreso tra 0,2 e 0,35 per una **capacità media di 10 kWh**. Sulla base delle ipotesi effettuate si stima che la domanda per sistemi di accumulo in Europa per quanto riguarda il settore residenziale, nell'intervallo di tempo considerato è visibile in tabella 2, l'andamento è mostrato nel grafico in figura 19.

Anno	Abitazioni [Milioni]	PFV	PB	Capacità media [kWh]	Domanda Totale [GWh]
2023	220	0,12	0,20	10	52,80
2024	220	0,12	0,22	10	58,95
2025	220	0,13	0,23	10	65,78
2026	220	0,13	0,25	10	73,43
2027	220	0,14	0,28	10	81,95
2028	220	0,14	0,30	10	91,39
2029	220	0,14	0,32	10	102,14
2030	220	0,15	0,35	10	114,04
2031	220	0,15	0,35	10	117,50
2032	220	0,16	0,35	10	121,12
2033	220	0,16	0,35	10	124,82
2034	220	0,17	0,35	10	128,59
2035	220	0,17	0,35	10	132,52
2036	220	0,18	0,35	10	136,52
2037	220	0,18	0,35	10	140,68
2038	220	0,19	0,35	10	144,99
2039	220	0,19	0,35	10	149,46
2040	220	0,20	0,35	10	154,00

Tabella 2: Stima della domanda in GWh di sistemi di accumulo per il settore residenziale 2023 - 2040

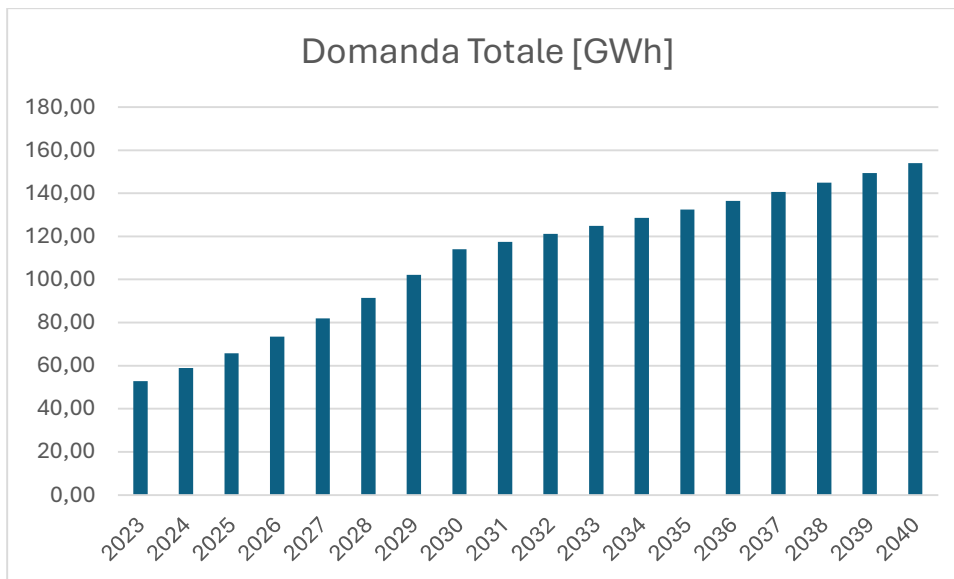


Figura 19: Stima dell'andamento della domanda di sistemi di accumulo in Europa 2023 – 2040

Come menzionato nella sezione 3.4, la quota prevista per i sistemi stazionari nel 2030 potrebbe essere di 600 GWh, coerentemente con i calcoli effettuati in precedenza la quota complementare ai sistemi di stazionamento per il settore residenziale, comprende anche altri utilizzi. Infatti, oltre ai sistemi stazionari per il residenziale la domanda comprende anche quelli per i sistemi industriali, per i sistemi di backup per infrastrutture critiche, per la stabilizzazione della rete elettrica.

#### 5.4 Scenari di simulazione e risultati attesi

Nella simulazione 1 è possibile osservare i seguenti risultati.

La figura 21 mostra l'andamento dello stock di materie prime, che cresce in modo esponenziale nell'arco temporale considerato. Nonostante questa crescita, si osserva una diminuzione del flusso di materie prime importate; ciò avviene perché, come evidenziato nella figura 27, aumenta progressivamente la quota di materie prime provenienti dal riciclo, riducendo così la necessità di importazioni. La figura 22 illustra l'andamento dello stock di batterie utilizzate per la prima volta nelle auto, rappresentando dunque tutte le auto elettriche circolanti il grafico mostra come si potrebbe avere una domanda di batterie per circa 30 Milioni di auto nel (2030, mese 84) , per una capacità stimata di 1800 GWh. L'unità di misura "Modulo" fa riferimento al singolo pacco batteria di un veicolo elettrico. L'incremento dello stock riflette una domanda crescente di auto elettriche, ipotizzata con un tasso di crescita annuale del 10%. Per determinare lo stock delle batterie dismesse, è stata considerata una vita media delle batterie pari a 10 anni, corrispondente a un tasso di dismissione annuale del 15%. Gli andamenti e le quantità degli stock di batterie da riciclare, riutilizzare e revisionare sono stati determinati assumendo che,

delle batterie dismesse, il 70% sia riutilizzabile, il 20% riciclabile e il 10% revisionabile. Inoltre, per le batterie riutilizzabili è stata ipotizzata una seconda vita media di 7 anni, trascorsa la quale anche queste batterie confluiscono nello stock da riciclare. I risultati della simulazione evidenziano l'importanza cruciale di gestire efficacemente la quantità di batterie destinate al riciclo, al fine di reimmettere i materiali recuperati all'inizio della supply chain e ridurre significativamente la dipendenza dalle materie prime importate.

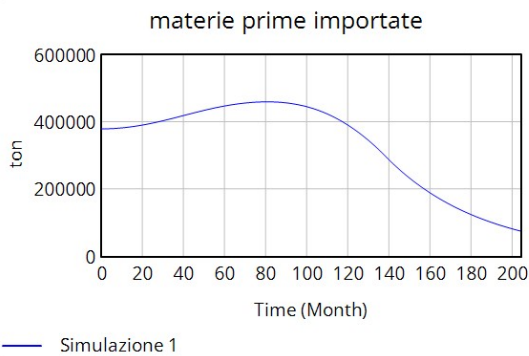


Figura 20

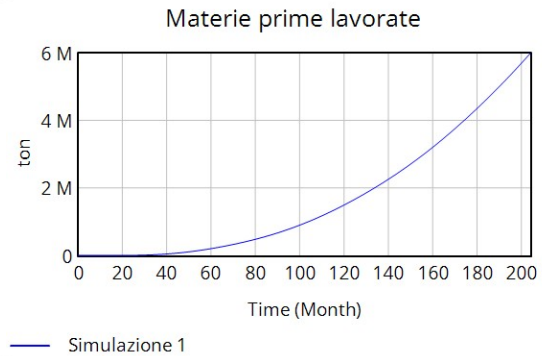


Figura 21

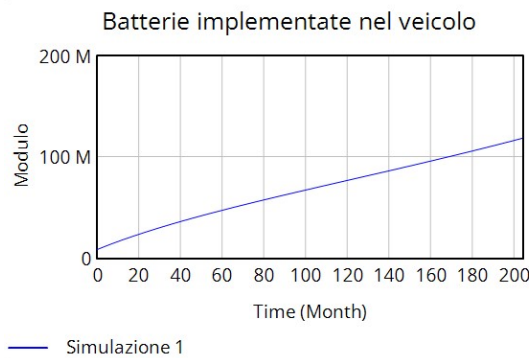


Figura 22

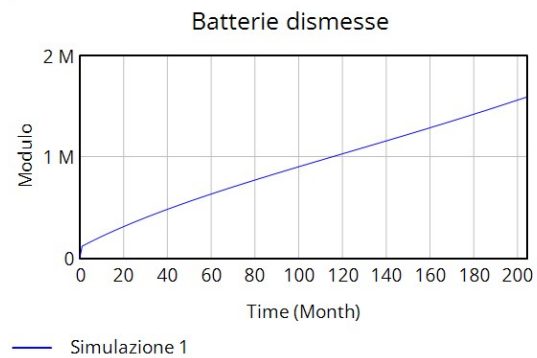


Figura 23

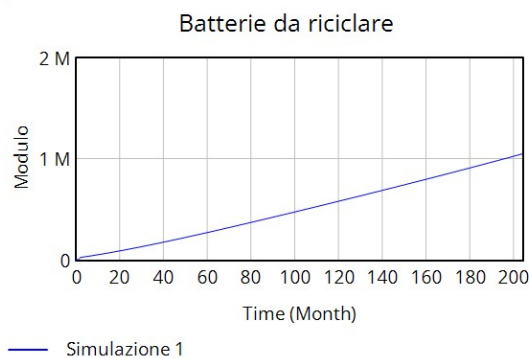


Figura 24

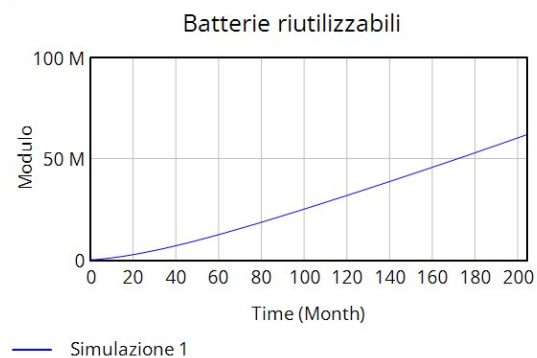


Figura 25

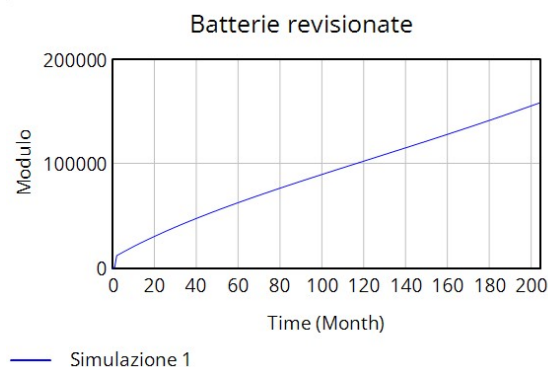


Figura 26

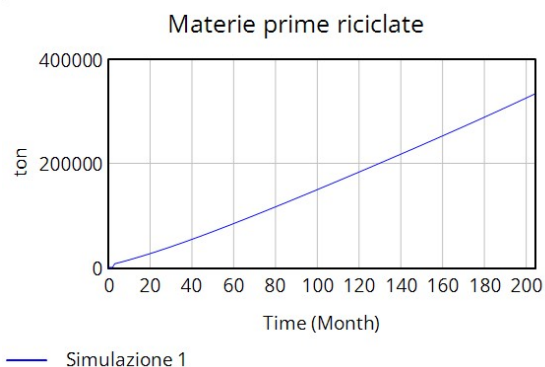


Figura 27

Le analisi effettuate suggeriscono che la quantità di batterie riutilizzabili si attesti intorno ai 20 milioni di pacchi batteria nel 2030 (mese 84), il che significa che considerando una capacità per pacco batteria di 60 kWh nominali potrebbe essere disponibile una capacità di 1200 GWh nominali, considerando però una capacità residua media intorno al 70 % si avrebbero 840 GWh. Confrontando la capacità disponibile con la stima della domanda per tutti gli impieghi stazionari di 600 GWh, si potrebbe potenzialmente soddisfare per intero.

Nella simulazione 2, posta a confronto con la prima simulazione, si analizzano gli effetti derivanti da una minore capacità di riciclo dei materiali recuperati dalle batterie.

Si osservano i seguenti risultati:

L'andamento delle materie prime lavorate internamente è significativamente inferiore rispetto a quanto registrato nella simulazione 1. Questa diminuzione è attribuibile alla minore disponibilità di materie prime derivanti dal processo di riciclo, come mostrato chiaramente nella figura 31. Tale situazione comporta inoltre un allungamento significativo dei tempi necessari per raggiungere un eventuale livello di indipendenza dalle importazioni di materie prime, come evidenziato nella figura 29. Contestualmente, si verifica un aumento dello stock di batterie destinate al riciclo, conseguenza diretta della riduzione della capacità produttiva degli impianti di riciclo, che impedisce una gestione ottimale delle batterie dismesse, diversamente da quanto avviene nella simulazione 1. Da notare che le quantità di ogni stock dipende fortemente dall'andamento dei flussi dei materiali, pertanto se i flussi in uscita non compensano quelli in ingresso, si possono avere degli accumuli importanti in alcuni stock e viceversa se i flussi in uscita sono elevati rispetto a quelli in ingresso si può avere uno svuotamento dello stock,

pertanto tra le funzioni sono stati inserite delle protezioni che evitano comportamenti completamente fuori dalla realtà come lo svuotamento oltre lo 0 di stock troppo vuoti e viceversa.

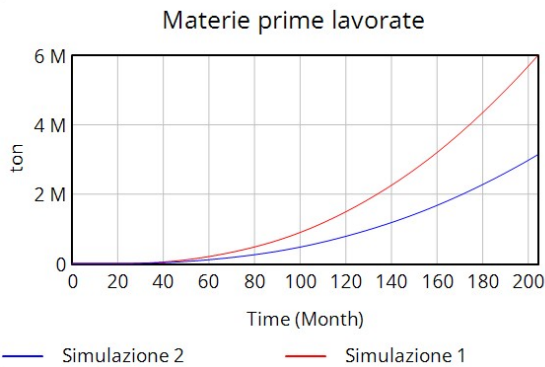


Figura 28

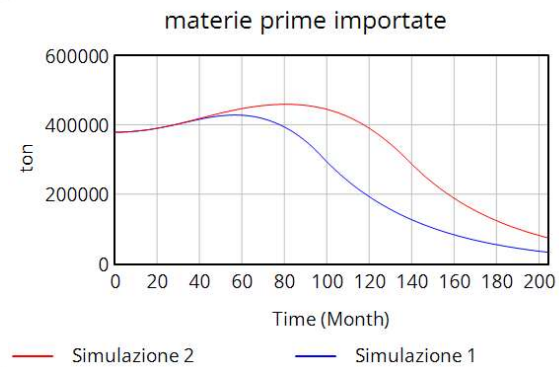


Figura 29

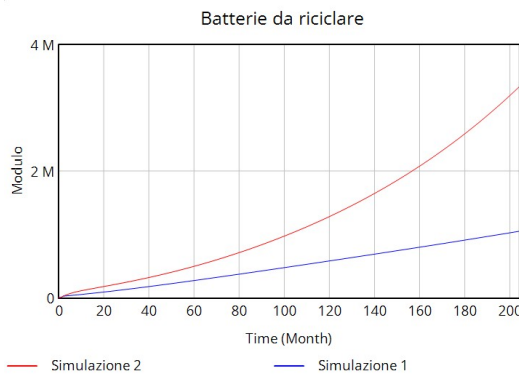


Figura 30

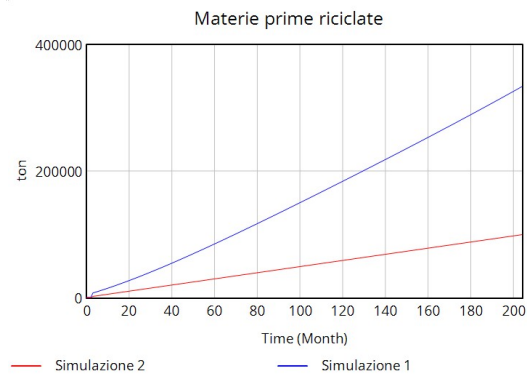


Figura 31

## 5.5 Limiti del modello

Il modello di simulazione Vensim effettuato è frutto di un primo approccio alla modellazione in ambiente System Dynamics, pertanto, pur avendo utilizzato come input e funzioni, dati prelevati da fonti autorevoli, il modello potrebbe contenere degli errori dovute ad approssimazioni che non rispecchiano la complessa realtà del tema trattato. Fra le limitazioni più rilevanti c'è sicuramente il considerare ipotesi statistiche e coefficienti costanti o con un andamento lineare nel tempo, in realtà queste variabili dipendono da molteplici fattori operativi, ambientali e tecnologici. Il modello è privo di considerazioni economico – finanziarie rispetto temi altamente rilevanti come i trasporti, il testing i costi di smontaggio e riciclo oppure dei risparmi dovuti al recupero di materie prime sia in termini economici che di emissioni. Un'altra approssimazione effettuata è stata non considerare l'enorme varietà di batterie, sia in termini di composizione chimica che di formati fisici, impedendo di cogliere le differenze che hanno un



impatto sulla durata o sui processi di riciclo da adottare. Inoltre, per parte dei risultati risulta assente il test di robustezza.

Il modello, dunque, vuole essere una buona base per approcciarsi al tema del riutilizzo e riciclo delle batterie dei veicoli elettrici. Pertanto, l'invito è quello di implementare tale modello con gli aspetti carenti precedentemente individuati per far sì che aderisca al meglio alla realtà.

## **6. Considerazioni finali**

La letteratura esaminata e i risultati acquisiti con le simulazioni del modello realizzato convergono nel mettere in luce l'opportunità di un utilizzo consapevole e sostenibile dei sistemi a batteria. Abbandonare la buona pratica nell'utilizzo quotidiano, fondato su semplici accorgimenti, consente di evitare il degrado precoce dei moduli e di prolungarne notevolmente la vita utile. La introduzione di una seconda vita di funzione, nei settori di riutilizzo sopra identificati, rappresenta un'ulteriore possibilità di ridurre il numero complessivo di batterie da produrre ex novo. Tale strategia presenta chiari vantaggi sia economici che ambientali, con la riduzione della domanda di nuova materia prima, la riduzione del numero di rifiuti tecnologici e con la limitazione delle emissioni connessa all'intero ciclo di vita del prodotto.

Le analisi condotte documentano inoltre come l'offerta delle batterie EV di seconda vita sia destinata a crescere sensibilmente negli anni a venire, stimolata dall'aumento esponenziale della domanda di veicoli elettrici in Europa, spinta dalle normative sempre più restrittive in tema di emissioni e mobilità sostenibile. Ma la supply chain europea delle batterie non riuscirà mai a replicare il modello cinese, segnato da una profonda integrazione verticale e da un controllo diretto delle risorse minerarie, produttive e distributive.

Proprio a causa di questa impossibilità strutturale, diventa essenziale per l'Europa investire strategicamente nel settore del riciclo e riutilizzo delle batterie. Aumentare l'efficienza dei processi di riciclo e portare a livello europeo la capacità produttiva degli impianti permetterebbe di ridurre sensibilmente la dipendenza dalle importazioni di materie prime critiche, come litio, cobalto e nichel, riducendo dunque la vulnerabilità della supply chain europea rispetto alle fluttuazioni geopolitiche e dei mercati globali. Affinché il sistema risulti davvero efficace, è essenziale implementare processi di riciclo efficienti e standardizzati, supportati da normative specifiche e da un quadro tecnologico affidabile. Solo attraverso la definizione di standard di prodotto e di processo sarà possibile costruire una filiera del riciclo solida e replicabile.

Parallelamente, è di assoluta importanza rafforzare le strutture per test e classificazione delle batterie vecchie che promuovessero l'uso di metodi nuovi come il Partial Discharge Test (PDT) a scopi di potenziamento della scelta delle batterie adatte al riutilizzo, sia nei sistemi di accumulo energetico domestici che industriali.

Infine, l'integrazione delle batterie in sistemi alimentati da fonti rinnovabili rappresenta un tassello imprescindibile per il futuro. Questa combinazione consente non solo di ridurre ulteriormente l'impatto ambientale complessivo, ma anche di potenziare la stabilità e la flessibilità delle reti energetiche, contribuendo a una transizione energetica più equa e resiliente.

## **7. Ringraziamenti**

Desidero esprimere la mia profonda gratitudine innanzitutto a mamma e papà, per il sostegno emotivo e finanziario che mi hanno sempre assicurato. Grazie per i valori che mi avete trasmesso e per avermi reso la persona che sono oggi. Un grande ringraziamento va ai miei fratelli, Salvo e Luca e la mia sorella acquisita Federica, per il costante supporto ricevuto durante tutto il mio percorso universitario e, in particolare, nei momenti finali di questo importante capitolo della mia vita. Ringrazio il piccolo Ennio, che con il suo arrivo ha portato gioia, felicità a tutta famiglia.

Un ringraziamento speciale a Nonna Teresa, presenza insostituibile da sempre, esempio di resilienza e forza d'animo insieme ai miei genitori. Ringrazio con affetto anche Nonno Giovanni, Nonna Giovanna, Nonno Salvatore e Zio Salvatore, che con la loro guida silenziosa e amorevole mi accompagnano sempre da lassù.

Grazie a Zia Enza e a mio cugino Michele, sempre pronti a sostenermi nei momenti di difficoltà, e a tutti i membri della mia grande famiglia, ciascuno dei quali ha contribuito a rendere speciale il mio percorso.

Ringrazio di cuore Lorenzo, Pierluigi, Emanuele, Arcangelo e Micaela, amici straordinari durante tutti i miei anni torinesi e oltre, sempre presenti, compagni di avventure passate e future. Un pensiero affettuoso ai Daichistolpèn e ai Boomerlooni, così come a tutti gli amici vicini e lontani che hanno fatto e continueranno a fare parte della mia vita.

Infine, non per importanza ringrazio Mariachiara: fin dal primo momento ho percepito in te qualcosa di speciale e ad oggi c'è ancora tanto da scoprire. Grazie per essermi stata vicino negli ultimi mesi e per condividere con me questo tratto importante del mio cammino.

## 8. Riferimenti

- [1] «<https://elektroautomatik.com/en/industries/battery-recycling/second-life/>,» [Online].
- [2] «renogy,» [Online].
- [3] M. -. E, «Il riciclo delle batterie dei veicoli elettrici @2050: scenari evolutivi e tecnologie abilitanti,» Milano, 2023.
- [4] E. C. o. auditors, «The EU's industrial policy on batteries,» 2023.
- [5] I. I. o. T. Department of Physics / Center for Solar Energy, «Cathode Materials for Lithium Ion Batteries (LIBs): A Review on Materialsrelated aspects towards High Energy Dendity LIBs,» Jodhpur, 2019.
- [6] \*. G. A. P. b. S. E. Z. c. J. R. M. P. ., Y. G. Anahita Jannesar Niri a, «Sustainability challenges throughout the electric vehicle battery value chain».
- [7] G. M. C. R. A. C. Anna C. Cagliano, «Lithium-ion Battery Procurement Strategies: Evidence from the Automotive Field,» Torino, 2020.
- [8] C. D. Shaik Nyamathulla, «A review of battery energy storage systems and advanced battery management system for different applications: Challenges and recommendations».
- [9] U. europea, «<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32023R1542>,» [Online].
- [10] C. d. c. europea, «La politica industriale dell'UE in materia di batterie,» 2023.
- [11] I. E. Agency, «Global EV outlook 2024,» 2024.
- [12] R. R. P. C. B. F. Alessandro Zini, «Il problema delle materie prime critiche per la transizione ecologica,» 2023.
- [13] «Statista,» [Online].
- [14] E. x, «Ricerca e innovazione per il riciclo delle batterie al litio,» Marzo 2023. [Online]. Available: <https://www.enelx.com/it/it/news/2023/03/midac-smaltimento-batterie-litio>.
- [15] Comau. [Online]. Available: <https://www.comau.com/it/2023/07/24/comau-per-le-tecnologie-di-riciclo-delle-batterie/>.
- [16] Vaielettrico. [Online]. Available: <https://www.vaielettrico.it/riciclo-batterie-ecco-i-numeri-del-nuovo-business/>.
- [17] M. M. S. L. ., P. S. A. M. Mohamed Ahmeid, «A rapid capacity evaluation of retired electric vehicle battery modules using partial discharge test».
- [18] J. D. Sterman, «Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World».
- [19] Eurostat, «Eurostat,» [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/>.
- [20] G. C. G. G. G. X. F. Elsa A. Olivetti, «Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals,» 2017.

## Ulteriori riferimenti

21. Sustainable Electric Vehicle Batteries for a Sustainable World: Perspectives on Battery Cathodes, Environment, Supply Chain, Manufacturing, Life Cycle, and Policy Zhijie Yang, Haibo Huang, and Feng Lin
22. A review of battery energy storage systems and advanced battery management system for different applications: Challenges and recommendations Shaik Nyamathulla , C. Dhanamjayulu
23. Towards the lithium-ion battery production network: Thinking beyond mineral supply chains Gavin Bridge, Erika Faigen
24. Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals Elsa A.Olivetti
25. Sources of uncertainty in the closed-loop supply chain of lithium-ion batteries for electric vehicles J.T. Marcos, C. Scheller
26. A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling G. Kannan a, P. Sasikumar
27. Unleashing the circular economy in the electric vehicle battery supply chain: A case study on data sharing and blockchain potential Elias Ribeiro da Silva , Jacob Lohmer , Michelle Rohla , Jannis Angelis
28. Electric Vehicle Battery Supply Chain and Critical Materials: A Brief Survey of State of the Art Pranjali Barman , Lachit Dutta and Brian Azzopardi
29. Remanufacturing electric vehicle battery supply chain under government subsidies and carbon trading: Optimal pricing and return policy Yu-Chung Tsao a,b,\* , Ho Thi Thu Ai a,b
30. A SWOT Analysis of the UK EV Battery Supply Chain Yun Zhang Louise Rysiecki Yu Gong 2 and Qi Shi
31. On the potential of vehicle-to-grid and second-life batteries to provide energy and material security Fernando Aguilar Lopez , Dirk Lauinger , François Vuille & Daniel B. Müller
32. A Comprehensive Review of Second Life Batteries Toward Sustainable Mechanisms: Potential, Challenges, and Future Prospects Jianwei Li , Member, IEEE, Shucheng He Zhongbao Wei , Student Member, IEEE, Qingqing Yang , Member, IEEE, , Senior Member, IEEE, Yang Li, and Hongwen He
33. Battery global value chain and its technological challenges for electric vehicle mobility Ailton Conde Jussani a, James Terence Coulter Wright b, Ugo Ibusuki c
34. A Game-Theoretic Analytical Approach for Fostering Energy-Saving Innovation in the Electric Vehicle Supply Chain Jun-bin Wang and Lufei Huang
35. A Conceptual Model for Integrating Sustainable Supply Chain, Electric Vehicles, and Renewable Energy Sources Ankit R. Patel, Dhaval R. Vyas, Anilkumar Markana
36. Exploring Second Life Applications for Electric Vehicle Batteries Felix VUa, Melanie RAHICa, Koteshwar CHIRUMALLAa,1 aMälardalen University, Eskilstuna, Sweden
37. Lithium-ion Battery Procurement Strategies: Evidence from the Automotive Field Anna C. Cagliano\*. Giulio Mangano.\* Carlo Rafele\*. Antonio Carlin\*

38. Sustainability challenges throughout the electric vehicle battery value chain  
Anahita Jannesar Niri , Gregory A. Poelzer , Steven E. Zhang , Jan Rosenkranz , Maria Pettersson, Yousef Ghorbani
39. Towards a business model for second-life batteries – barriers, opportunities, uncertainties, and technologies  
Carlos Antônio Rufino Júnior,d, Eleonora Riva Sanseverino,b, Pierluigi Gallo,b,c, Daniel Kochd, Yash Kotakd, Hans-Georg Schweigerd, Hudson Zanina,\*
40. The EU’s industrial policy on batteries  
European court of auditors
41. Report ecobat
42. The electric vehicle revolution: Critical material supply chains, trade and development  
Benjamin Jones, Viet Nguyen-Tien, Robert J. R. Elliott
43. Main Drivers of Battery Industry Changes: Electric Vehicles—A Market Overview  
Dmitry V. Pelegov, José Pontes
44. Sustainable Electric Vehicle Batteries for a Sustainable World: Perspectives on Battery Cathodes, Environment, Supply Chain, Manufacturing, Life Cycle, and Policy  
Zhijie Yang, Haibo Huang, Feng Lin
45. A comprehensive overview of decommissioned lithium-ion battery recycling: Towards green and economical  
Chenkai Dong , Chunguang Liu , Zengliang Qin , Jiayu Deng , Youcai Zhu
46. Exponential adoption of battery electric cars  
Felix Jung,<sup>1</sup> Malte Schröder,<sup>1</sup> and Marc Timmel,<sup>2</sup>

link

1. <https://www.batterydesign.net/tesla-4680-cell/>
2. <https://www.batemo.com/products/batemo-cell-explorer/unknown-manufacturer-tesla-model-y-4680/>
3. <https://www.rinnovabili.it/energia/accumulo/batterie-4680-per-auto-elettriche-siamo-al-punto-di-svolta/> Redazione " Rinnovabili"
4. The\_Supply\_Chain\_Advantages\_and\_Challenges\_of\_BYD\_ School of Politics & Public Administration, Soochow University, Suzhou, 215000, China
5. <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>
6. <https://link.springer.com/article/10.1007/s38313-021-0712>
7. <https://www.laserax.com/blog/ev-battery-manufacturing-process>
8. <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/costs-nickel-cobalt-used-electric-vehicle-batteries-2022-02-03/>
9. <https://www.pveurope.eu/e-mobility/electric-vehicles-global-ev-count-climbs-109-million>
10. <https://newatlas.com/automotive/panasonic-4680-battery-factory/>
11. <https://insideevs.com/news/733985/tesla-4680-manufacturing-milestone-100m/>
12. <https://www.evlithium.com/Blog/4680-battery-power-innovation.html>
13. <https://www.batterydesign.net/tesla-4680-cell/>
14. <https://www.neware.net/news/tesla-4680-battery-disassembly-and-characterization/230/76.html>

