Università degli Studi
di Modena e Reggio Emilia

Dipartimento di Scienze
e Metodi dell'Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Gestionale

Analisi e ottimizzazione degli investimenti per la gestione delle batterie a fine vita in Italia: un modello System Dynamics per la pianificazione di disassemblaggio e riciclo nella transizione energetica

Relatrice:
Dott.ssa Maria Angela Butturi
Correlatore:
Dott. Alessandro Neri

Laureando:
Emanuele Barreca

Anno Accademico 2024/2025

Indice

1 Introduzione **8**

2 Stato dell'arte e fondamenti teorici **14**

2.1 Stato dell'arte 14

2.2 La System Dynamics 18

3 Metodologia **21**

3.1 Il modello in System Dynamics 22

3.1.1 Capacity model: mercato dei veicoli elettrici e primo fine vita 24

3.1.2 Capacity model: riciclo diretto o utilizzo per scopi stazionari . 34

3.1.3 Capacity model: ricapitolazione 38

3.1.4 Investment model 39

3.2 Il modello di ottimizzazione lineare per gli investimenti 45

4 Risultati della simulazione **52**

4.1 Scenari Business As Usual (BAU) 59

4.1.1 BAU 1: 40% export; riciclo 50% - riutilizzo 50%; gap medio . 60

4.1.2 BAU 2: 80% export; riciclo 20% - riutilizzo 80%; gap alto . . . 61

4.1.3 BAU 3: 0% export; riciclo 80% - riutilizzo 20%; gap basso . . 62

4.2 Scenari Internal Combustion Engine Ban (ICE BAN) 63

4.2.1 ICE BAN 1: 40% export; riciclo 50% - riutilizzo 50%; gap medio 64

4.2.2 ICE BAN 2: 80% export; riciclo 20% - riutilizzo 80%; gap alto 64

4.2.3 ICE BAN 3: 0% export; riciclo 80% - riutilizzo 20%; gap basso 65

4.3 Scenari NET ZERO 66

4.3.1 NET ZERO 1: 40% export; riciclo 50% - riutilizzo 50%, gap medio 67

4.3.2 NET ZERO 2: 80% export; riciclo 20% - riutilizzo 80%, gap alto . . . 68

4.3.3 NET ZERO 3: 0% export; riciclo 80% - riutilizzo 20%, gap basso . . . 69

4.4 Risultati a confronto . . . 70

5 Discussione dei risultati ottenuti 73

5.1 Considerazioni preliminari . . . 73

5.2 Disassemblaggio: il ruolo degli investimenti . . . 79

5.3 Riciclo: scenari equilibrati . . . 81

5.4 Riciclo: scenari conservativi . . . 83

5.5 Riciclo: scenari pionieristici . . . 85

5.6 Scenario europeo più probabile e conseguente strategia . . . 87

5.7 Limitazioni del lavoro svolto . . . 89

6 Conclusioni 93

A Funzioni utilizzate su AnyLogic 96

A.1 Delay e Delay3 . . . 96

A.2 Investment rate disassembly function . . . 98

A.3 Investment rate recycling function . . . 99

B I modelli di ottimizzazione lineare 100

Elenco delle figure

1 Modello SD intero 23

2 Modello da batterie sul mercato a fine prima vita 24

3 Modello riciclo e riutilizzo 34

4 Modello di investimenti per il disassemblaggio 39

5 Modello di investimenti per il riciclaggio 41

6 Risultati generali Business As Usual 60

7 Risultati BAU 1 60

8 Risultati BAU 2 61

9 Risultati BAU 3 63

10 Risultati generali ICE BAN 63

11 Risultati ICE BAN 1 64

12 Risultati ICE BAN 2 65

13 Risultati ICE BAN 3 66

14 Risultati generali NET ZERO 67

15 Risultati NET ZERO 1 68

16 Risultati NET ZERO 2 69

17 Risultati NET ZERO 3 70

18 Confronto tra i tre scenari: prima vita e primo fine vita 74

19 Confronto BAU, ICE BAN, NET ZERO: investimenti per il disassemblaggio 78

Elenco delle tabelle

1 Confronto tra riciclo e riutilizzo delle batterie a fine vita 10

2 Confronto tra i sei studi basati su System Dynamics nel settore delle batterie per veicoli elettrici (1) 17

3 Confronto tra i sei studi basati su System Dynamics nel settore delle batterie per veicoli elettrici (2) 17

4 Sostituzione di batterie NMC con LFP (Bianchetti et al. (2023)) . . . 26

5 Volume del mercato automobilistico italiano 27

6 Parametri di Weibull 29

7 Vita media delle batterie 30

8 Capacità media annuale degli impianti di disassemblaggio $[\frac{battery}{year}]$ . . 46

9 Costi variabili degli impianti di disassemblaggio $[\frac{euro}{battery}]$ 47

10 Capacità media annuale degli impianti di riciclaggio $[\frac{t}{year}]$ 49

11 Costi variabili degli impianti di riciclaggio $[\frac{euro}{t}]$ 50

12 Scenari selezionati per la simulazione 55

13 Confronto tra batterie in strada e batterie a fine vita nei diversi scenari 70

14 Confronto tra batterie esportate e batterie non esportate nei diversi scenari 71

15 Confronto tra batterie riciclate e batterie in seconda vita nei diversi scenari 71

16 Confronto tra capacità aggiunta di disassemblaggio e riciclo nei diversi scenari 71

17 Numero di impianti di disassemblaggio per categoria nei diversi scenari 72

18 Costi di investimento e costi totali di disassemblaggio nei diversi scenari 72

19 Numero di impianti di riciclo per categoria nei diversi scenari 72

20 Costi di investimento e costi totali di riciclo nei diversi scenari 72

21 Valori batterie in strada al 2050 e cumulata batterie che hanno raggiunto la fine prima vita dal 2010 al 2050 74

Sommario

L'aumento della diffusione dei veicoli elettrici (EV) comporta una crescita significativa del numero di batterie agli ioni di litio (LIB) che raggiungeranno la fine della loro prima vita (End-of-Life, EOL) nei prossimi decenni. La gestione di questo flusso di batterie rappresenta una sfida cruciale dal punto di vista industriale ed economico, poiché richiede investimenti infrastrutturali per il disassemblaggio e il riciclo, in conformità con le normative europee emergenti, tra cui il Regolamento UE 2023/1542. Questa tesi sviluppa un modello di simulazione in System Dynamics, implementato in AnyLogic, per analizzare l'evoluzione del parco batterie EV nel mercato italiano fino al 2050. L'obiettivo è quantificare la capacità impiantistica richiesta e stimare gli investimenti necessari per il trattamento delle batterie a fine vita. Il modello considera tre scenari di sviluppo del mercato: Business as Usual (BAU), Internal Combustion Engine Ban (ICE BAN) e Net Zero, valutandone l'impatto sugli investimenti infrastrutturali e le strategie di gestione della filiera. L'analisi evidenzia che, in assenza di un adeguato piano di investimenti, la capacità attuale di disassemblaggio e riciclo risulta insufficiente a soddisfare la domanda futura, generando colli di bottiglia significativi nella supply chain. Inoltre, il modello consente di identificare il range ottimale di investimenti necessari per garantire la sostenibilità economica del settore, tenendo conto degli scenari più probabilisticamente realizzabili e dei costi di implementazione. I risultati forniscono un supporto quantitativo per la pianificazione strategica del settore e per la definizione di politiche industriali finalizzate a una gestione efficiente delle batterie a fine vita, contribuendo alla transizione verso un modello di economia circolare sostenibile non solo ambientalmente, ma anche tenendo conto degli aspetti economici.

1 Introduzione

Le batterie agli ioni di litio sono oggi la tecnologia dominante per l'alimentazione dei veicoli elettrici e per l'accumulo di energia, grazie alla loro elevata densità energetica, lunga durata e capacità di ricarica rapida. Esse giocano un ruolo cruciale nella transizione energetica, consentendo di contribuire alla decarbonizzazione del settore dei trasporti e favorendo anche un maggiore utilizzo delle fonti rinnovabili grazie ai loro possibili usi stazionari. Nonostante ciò, le batterie agli ioni di litio presentano diverse criticità, specialmente in relazione alla loro fine vita (End-of-Life). Una batteria è generalmente considerata a fine vita quando la sua capacità scende al di sotto dell'80% rispetto al valore iniziale, rendendola inadatta per applicazioni nel settore automobilistico. Si stima che, tra il 2040 e il 2050, milioni di batterie per veicoli elettrici raggiungeranno la fine della loro vita, generando un flusso di rifiuti significativo e ponendo problemi sia ambientali che economici (Seika, Kubli (2024)). Un aspetto critico della gestione delle batterie a fine vita riguarda i materiali di cui sono composte, infatti le batterie EV contengono metalli strategici e materiali critici come litio, cobalto e nichel, che sono essenziali per la produzione di nuove celle e il cui approvvigionamento è soggetto a forti tensioni geopolitiche e volatilità dei prezzi. L'Unione Europea considera tali materiali come critici a causa della loro dipendenza da fornitori extraeuropei, principalmente Cina, Repubblica Democratica del Congo e Sud America (European Parliament and Council of the European Union (2023)). Il recupero di questi materiali tramite il riciclo diventa quindi strategico per garantire una supply chain più sostenibile e resiliente.

Disassemblaggio e riciclo Il trattamento delle batterie a fine vita, nel caso in cui si voglia procedere a farle giungere alla fine al riciclo, si articola in due fasi fondamentali: il disassemblaggio e il riciclo. Il disassemblaggio è un passaggio indispensabile, in quanto consente di smontare le batterie a livello di modulo o cella e di valutarne le condizioni prima di determinarne la destinazione finale. Secondo Rosenberg et al. (2023), il trattamento delle batterie inizia proprio con il disassemblaggio stesso, che permette di separare i componenti principali della batteria. Questo processo è necessario affinché si possa stabilire con certezza se una batteria debba essere riciclata, riutilizzata in seconda vita o esportata per il trattamento in impianti specializzati. Tale lavorazione consente infatti di determinare quali moduli possono essere recuperati per il riutilizzo e quali devono essere avviati al riciclo. Un pacco batteria intero non può infatti essere inviato direttamente al riciclo o alla seconda vita, poiché la valutazione delle condizioni dei singoli moduli è essenziale per ottimizzare tutto il processo di gestione della fine vita e per capire esattamente che percorso far compiere agli stessi. Inoltre, il trasporto e l'esportazione di pacchi batteria interi possono risultare meno efficienti e più onerosi, sia in termini economici che normativi, dato che sono più ingombranti, non si è certi delle condizioni esatte delle celle e dei moduli a livello di capacità e sicurezza e chi deve ricevere la merce sono informazioni che invece esige sapere. Il Regolamento (UE) 2023/1542 stabilisce specifici requisiti per la gestione delle batterie a fine vita, imponendo standard di trattamento e tracciabilità per garantire che ogni batteria venga gestita in modo

conforme alle normative ambientali europee (European Parliament and Council of the European Union (2023)). In particolare, la separazione preliminare delle batterie in moduli può agevolare l'esportazione, evitando di spedire componenti inutilizzabili e riducendo i costi logistici. A differenza del disassemblaggio, il riciclo è un processo essenziale per la chiusura del ciclo dei materiali e si basa su tecniche avanzate come pirometallurgia, idrometallurgia e processi meccanici di separazione, che consentono il recupero di materiali critici come litio, nichel e cobalto (Harper et al. (2019)). Anche se il riciclo è una fase cruciale per garantire il recupero di materie prime preziose e ridurre la dipendenza da risorse critiche da dover estrarre o acquistare come nuove, non tutte le batterie devono essere avviate direttamente a questo processo. Il disassemblaggio permette infatti di identificare anche le batterie idonee per essere esportate o per il riutilizzo in applicazioni stazionarie, estendendone la vita utile prima del riciclo. L'ottimizzazione della gestione delle batterie a fine vita dipende quindi dall'integrazione efficace di entrambe le fasi: il disassemblaggio, che consente di selezionare la destinazione più appropriata per ogni componente, e il riciclo, che permette di recuperare materiali preziosi in modo efficiente. Garantire che il primo avvenga prima di ogni altra operazione è fondamentale per migliorare la sostenibilità economica e ambientale del trattamento delle batterie, riducendo sprechi e massimizzando il valore delle risorse recuperate.

Riciclo e riutilizzo Per gestire l'enorme quantità di batterie a fine vita prevista nei prossimi decenni, una volta disassemblate e trattenute nel Paese, si possono adottare due principali strategie di economia circolare:

- **riciclo (one-loop system)**: processo che mira al recupero dei materiali critici (litio, cobalto, nichel, rame e alluminio) contenuti nelle batterie per la produzione di nuove celle (Seika, Kubli (2024));
- **riutilizzo in applicazioni stazionarie (two-loop system)**: impiego delle batterie in sistemi di accumulo per impianti fotovoltaici o reti elettriche, sfruttandone la capacità residua prima di avviarle al riciclo definitivo (Nurdiawati, Agrawal (2022)).

Nella tabella 1 sono indicati i principali vantaggi e svantaggi che possono emergere dalla decisione di avvalersi di una o piuttosto dell'altra strategia di gestione delle batterie a fine vita.

Strategia	Vantaggi	Svantaggi
Riciclo (One-loop system)	• recupero di materiali critici (litio, cobalto, nichel), riducendo la dipendenza dalle materie prime da estrarre come nuove; • necessario per soddisfare le quote obbligatorie imposte dal Regolamento UE 2023/1542; • contribuisce a una filiera chiusa e circolare.	• elevati costi energetici e infrastrutturali; • perdita parziale di materiali durante il processo di riciclo; • necessità di tecnologie avanzate per aumentare l'efficienza del recupero.
Riutilizzo (Two-loop system)	• estende la vita utile delle batterie, riducendo il numero di nuove produzioni; • minore impatto ambientale rispetto al riciclo immediato; • può supportare la stabilità della rete elettrica se impiegato in sistemi di accumulo.	• richiede test e selezione delle batterie, aumentando i costi iniziali; • compatibilità limitata con alcune applicazioni stazionarie; • alla fine della seconda vita, il riciclo è comunque necessario.

Tabella 1: Confronto tra riciclo e riutilizzo delle batterie a fine vita

Fonti: (Neumann et al. (2022), Olivetti et al. (2017), Rosenberg et al. (2023), Nurdiawati, Agrawal (2022), Al-Alawi et al. (2022))

Attualmente, il mercato è diviso tra queste due strategie, con una crescente enfasi sulle applicazioni di seconda vita a causa del loro potenziale economico e della riduzione dell'impatto ambientale. La domanda di materiali riciclati è comunque destinata ad aumentare, rendendo necessario il potenziamento degli impianti di riciclo in Europa.

Il regolamento UE 2023/1543 Attualmente, la catena di approvvigionamento di materiali critici per la produzione di nuove batterie (litio, nichel, cobalto e grafite) è fortemente dipendente da Paesi extraeuropei, come Cina, Repubblica Democratica del Congo e Sud America, generando rischi geopolitici e volatilità nei prezzi delle materie prime (Olivetti et al. (2017)). Inoltre, l'aumento esponenziale delle batterie a fine vita previsto tra il 2040 e il 2050 pone due grandi sfide per l'Unione Europea (UE):

- **ambientale**: evitare che milioni di batterie diventino rifiuti pericolosi, con il rischio di contaminazione del suolo e delle falde acquifere se non trattate correttamente;

- **industriale**: creare una filiera europea per il riciclo delle batterie, riducendo la dipendenza dalle materie prime vergini importate e assicurando un approvvigionamento stabile di materiali critici.

Per affrontare questi problemi, l'Unione Europea ha introdotto il Regolamento UE 2023/1542 (European Parliament and Council of the European Union (2023)), che stabilisce una serie di norme vincolanti per l'intero ciclo di vita delle batterie, dalla produzione al fine vita, con l'obiettivo di promuovere un'economia circolare e garantire una gestione più sostenibile delle risorse strategiche. Il Regolamento ha diversi obiettivi chiave:

- sviluppare un'economia circolare per le batterie, riducendo il consumo di materie prime vergini e incentivando il recupero di materiali critici tramite il riciclo;
- promuovere il riutilizzo delle batterie, favorendo la loro seconda vita in applicazioni stazionarie prima del riciclo finale;
- imporre obblighi ai produttori di batterie, affinché garantiscano trasparenza, tracciabilità e sostenibilità nella gestione delle batterie;
- creare un sistema normativo uniforme per tutti i Paesi membri dell'UE, evitando differenze regolatorie tra stati e facilitando la crescita di un mercato comune del riciclo.

Queste misure hanno un impatto diretto sui produttori di veicoli e batterie, che dovranno adattare le loro strategie industriali per conformarsi ai nuovi requisiti normativi e ogni stato sarà costretto ad effettuare alcuni investimenti per un'infrastruttura adeguata a gestire la sempre maggiore richiesta di riciclo di batterie e l'aumento delle stesse sul mercato. Uno degli aspetti più innovativi del regolamento è l'introduzione di quote obbligatorie di materiali riciclati per la produzione di nuove batterie. A partire dal 2031, le batterie agli ioni di litio dovranno contenere una quota minima di materiali riciclati provenienti dal recupero di batterie a fine vita. Le percentuali obbligatorie aumenteranno progressivamente fino al 2036: dal 2031, almeno il 16% del cobalto, il 6% del litio e il 6% del nichel nelle nuove batterie dovrà provenire da materiali riciclati; dal 2036, queste quote aumenteranno significativamente, con il 26% del cobalto, il 12% del litio e il 15% del nichel che dovranno essere recuperati da batterie a fine vita. Questi requisiti costringeranno i produttori di batterie a investire nel riciclo e a ridurre l'uso di materie prime vergini, contribuendo alla creazione di un mercato europeo del riciclo delle batterie. L'introduzione di quote obbligatorie e requisiti normativi stringenti avrà quindi un impatto significativo sul mercato delle batterie EV e sulla loro gestione a fine vita:

1. **aumento della domanda di riciclo e nuove infrastrutture**: il rispetto delle quote obbligatorie impone un incremento massiccio della capacità di riciclo in Europa, che attualmente è insufficiente per soddisfare la domanda

prevista, il che renderà necessario un rapido sviluppo di nuovi impianti di disassemblaggio e riciclo (Rosenberg et al. (2023)); senza un'adeguata capacità di trattamento, le aziende rischiano di non poter rispettare i vincoli normativi, con conseguenti sanzioni o difficoltà nell'accesso al mercato europeo;

2. **maggiore pressione sui produttori di batterie**: i produttori di batterie e veicoli elettrici dovranno integrare nei loro processi produttivi materiali riciclati riprogettando la catena di fornitura, collaborare con aziende di riciclo per garantire il recupero efficiente dei materiali ed ottimizzare la progettazione delle batterie per facilitare il disassemblaggio e il riciclo. Queste nuove sfide comporteranno costi iniziali elevati per adeguarsi alle normative, ma nel lungo periodo potranno ridurre la dipendenza dalle materie prime vergini e stabilizzare i costi di produzione.

3. **riduzione della dipendenza dalle importazioni di materiali critici**: uno degli effetti più strategici del regolamento sarà la riduzione della dipendenza europea da fornitori esteri di litio, cobalto e nichel. Attualmente, oltre il 70% del cobalto mondiale proviene dalla Repubblica Democratica del Congo, mentre la Cina domina la raffinazione del litio e del nichel (Olivetti et al. (2017)). Grazie all'aumento del riciclo, l'Europa potrà ridurre il rischio di interruzioni nella supply chain e stabilizzare anche i costi di approvvigionamento, favorendo un'industria delle batterie più resiliente e autonoma.

Il Regolamento UE 2023/1542 rappresenta quindi una svolta per la gestione delle batterie agli ioni di litio e per l'intero mercato dell'economia circolare in Europa. Le quote obbligatorie di materiali riciclati costringeranno aziende e governi a investire nel riciclo e nell'infrastruttura necessaria per far fronte alla futura domanda crescente di trattamento. Nei prossimi capitoli, verrà analizzato come l'Italia potrà rispondere a questa sfida e quali investimenti saranno necessari per garantire una gestione sostenibile delle batterie EOL nel mercato nazionale.

Scopo della tesi e domande di ricerca L'obiettivo di questa tesi è simulare l'evoluzione delle batterie EV a fine vita nel mercato italiano fino al 2050 e quantificare gli investimenti necessari per il disassemblaggio e il riciclo, valutando come le diverse politiche e strategie industriali possano influenzare il sistema. Per farlo, viene sviluppato un modello di simulazione System Dynamics, implementato in AnyLogic, che permette di analizzare i flussi di batterie nel tempo, identificando potenziali colli di bottiglia e stimando il fabbisogno infrastrutturale per il trattamento delle batterie a fine vita. Per rispondere a questa esigenza, la tesi si pone due domande di ricerca chiave:

- **RQ1**: quale sarà l'andamento delle batterie a fine vita nel mercato italiano fino al 2050, considerando diversi scenari di evoluzione del settore?
- **RQ2**: quale capacità di disassemblaggio e riciclo sarà necessaria per far fronte alla domanda e quali saranno i costi di investimento associati?

Attraverso l'analisi dei risultati della simulazione, questa ricerca fornirà una base quantitativa per la definizione di strategie industriali e politiche di investimento nel settore del riciclo delle batterie in Italia, contribuendo a delineare scenari realistici per il rispetto delle normative europee e la transizione verso un'economia circolare sostenibile.

La tesi è strutturata in cinque capitoli principali, oltre all'introduzione, per fornire un'analisi completa sulla gestione delle batterie EV a fine vita e sugli investimenti necessari per il disassemblaggio e il riciclo.

- **Capitolo 2 - Stato dell'arte e fondamenti teorici**: viene presentata una panoramica inerente il settore del trattamento delle batterie agli ioni di litio a fine vita, con un'analisi di alcune delle principali ricerche scientifiche in materia, con lo scopo di contestualizzare il lavoro svolto ed inserirlo nel panorama scientifico di riferimento. Viene presentata oltretutto la metodologia System Dynamics, fondamentale per lo sviluppo della tesi;
- **Capitolo 3 - Metodologia**: si descrive il modello di simulazione sviluppato in System Dynamics con AnyLogic, illustrando le assunzioni alla base della simulazione, la modellazione dei flussi di batterie EOL e il modello di ottimizzazione per stimare gli investimenti richiesti;
- **Capitolo 4 - Risultati**: vengono presentati i risultati della simulazione per i diversi scenari di mercato, mostrando l'evoluzione delle batterie a fine vita, la capacità impiantistica necessaria e le implicazioni economiche delle strategie di riciclo e disassemblaggio;
- **Capitolo 5 - Discussione**: i risultati ottenuti vengono analizzati in dettaglio, confrontando i diversi scenari e valutando le strategie più efficaci per garantire la sostenibilità della filiera del riciclo in Italia, anche alla luce delle normative europee;
- **Capitolo 6 – Conclusioni**: si riassumono le principali evidenze emerse dalla ricerca, si discutono le implicazioni per il settore e si propongono possibili sviluppi futuri per migliorare la gestione delle batterie a fine vita.

2 Stato dell'arte e fondamenti teorici

2.1 Stato dell'arte

La crescente importanza che negli ultimi anni hanno acquisito le batterie agli ioni di litio ha portato l'ambiente scientifico ed accademico ad interessarsi molto al settore, anche in relazione al regolamento e alle normative europee emergenti, come il regolamento europeo 2023/1542 (European Parliament and Council of the European Union (2023)). Il fine vita delle batterie e il modo di affrontarlo e gestirlo, in relazione a tutte le possibilità viste nel capitolo dell'introduzione, hanno portato molti accademici ed esperti a svolgere analisi e sperimentazioni a riguardo, con lo scopo di conferire più chiarezza ed esaustività ad un settore ancora in via di sviluppo ed in preda all'incertezza evolutiva di leggi, regolamenti e scenari geopolitici. L'importanza dell'argomento è anche economica e non solo ambientale, dato che molti stati dovranno effettuare nuovi investimenti per riuscire a far fronte alle nuove necessità ed adattarsi ai cambiamenti contestuali, senza rimanere indietro nel mercato e per evitare di incorrere in possibili sanzioni per il mancato rispetto delle quote minime di riciclo richieste. Vengono spesso utilizzati per questo tipo di analisi dei modelli di System Dynamics, che possono garantire di avere una visione d'insieme della struttura del problema e permettere, variando parametri e scenari, di fare un'analisi di simulazione a lungo termine e ad alto livello di astrazione, riuscendo a simulare anche contesti di grande incertezza e con dati previsionali e non puntuali a disposizione, confrontando tra loro scenari macroeconomici e mostrando l'influenza di normative e interventi esterni sul settore. Si possono quindi analizzare alcuni studi determinanti per lo stato dell'arte dell'argomento in questione, per andare correttamente a delineare il campo di studio, di sperimentazione e di analisi in cui si colloca questa tesi.

Gao et al. (2024) hanno effettuato uno studio inerente lo sviluppo dei veicoli ad energia pulita, con l'obiettivo di valutare l'impatto delle politiche di finanziamento delle infrastrutture di ricarica sulla loro diffusione nelle grandi città. Hanno utilizzato modelli di System Dynamics per simulare le dinamiche di mercato e l'evoluzione della concorrenza tra i veicoli elettrici a batteria (BEV) ed i veicoli a celle a combustibile (FCEV), simulando la crescita del mercato tra il 2021 ed il 2040. Per validare il modello hanno poi utilizzato un test di sensibilità attraverso simulazioni MonteCarlo. I risultati della loro simulazione mostrano che il finanziamento delle infrastrutture di ricarica pubblica e delle stazioni di rifornimento a idrogeno ha un impatto positivo sulla diffusione dei veicoli a energia pulita, ma degli investimenti ripartiti in modo squilibrato potrebbero favorire una competizione tra veicoli a celle a combustibile e veicoli a batteria elettrica piuttosto che accelerare la transizione verso un trasporto a emissioni zero. Solo una strategia equamente ripartita tra le due tecnologie può garantire uno sviluppo sostenibile del mercato. L'articolo evidenzia quindi come il finanziamento delle infrastrutture sia un elemento critico per le strategie di investimento a lungo termine.

Shaikh et al. (2023), invece, hanno analizzato il processo di rigenerazione delle batterie a fine vita per estenderne l'utilizzo in utilizzi di seconda vita. Per farlo hanno proposto un modello in System Dynamics ed un'analisi dei costi associati. Hanno analizzato tre scenari, ovvero vendita di batterie rigenerate a livello locale, a livello regionale o su scala nazionale ed i risultati che hanno ottenuto dimostrano che il costo medio di rigenerazione è inferiore rispetto al costo di acquisto di nuove batterie e che il costo della stessa varia in funzione della logistica e delle economie di scala. Hanno concluso anche che un modello di economia circolare con rigenerazione può estendere la vita utile delle batterie fino a 10 anni generando ulteriori entrate e riducendo la domanda di nuove batterie e la produzione di gas serra rispetto al riciclo immediato. Il modello proposto evidenzia quindi un confronto tra riciclo e riutilizzo, dimostrando come la rigenerazione possa offrire una buona soluzione intermedia prima del riciclo finale massimizzando il valore economico delle batterie, come la scala operativa dei tre scenari sia determinante per la sostenibilità economica e come incentivi governativi siano essenziali per favorire la transizione verso un modello di economia circolare per le batterie.

Bhanu et al. (2024) hanno analizzato i fattori che influenzano la domanda di batterie agli ioni di litio (LIB) nel settore della mobilità elettrica, per comprendere le dinamiche di mercato legate alla capacità delle batterie, alla loro composizione elettrochimica e alle politiche di sussidi governativi, valutandone l'impatto sul costo per kWh. Hanno sviluppato un modello di System Dynamics che analizzasse tre dimensioni chiave, ovvero ansia da autonomia dei consumatori (ovvero la paura che possono avere i consumatori di non riuscire a sostenere tratti lunghi di strada con la ricarica dell'autovettura) e capacità della batteria, l'impatto dei sussidi governativi e la composizione chimica delle batterie. Hanno riscontrato che quando la capacità della batteria raggiunge una soglia sufficiente, l'ansia da autonomia diventa trascurabile e la domanda di EV cresce, ma aumentare la capacità ha un forte impatto sui costi che vanno bilanciati con economie di scala. Dimostrano che la domanda di LIB è più alta nei primi anni di un programma di incentivi, ma tende a stabilizzarsi dopo la loro eliminazione grazie a effetti di apprendimento. La composizione chimica delle LIB influenza costi e domanda, infatti, ad esempio, le batterie NMC811 e NCA risultano più economiche delle NMC622, grazie a una minore dipendenza dal cobalto, ed inoltre le economie di scala e gli effetti di apprendimento riducono i costi che possono andarsi a creare nel lungo periodo. Il modello aiuta quindi a comprendere le interazioni tra capacità delle batterie, ansia da autonomia e domanda di LIB, evidenziando l'importanza delle dinamiche di mercato e delle interazioni che le batterie hanno con politiche pubbliche e innovazioni tecnologiche.

Pratap et al. (2024) considerano le strategie di economia circolare per il recupero di materie prime dalle LIB alla fine della loro prima vita, con un focus su riciclo e riutilizzo. Utilizzano un modello di System Dynamics per valutare l'impatto di diverse politiche di raccolta e gestione delle batterie sulla quantità di materiali recuperati e sulla disponibilità di batterie per il loro utilizzo in seconda vita. Simulano le interazioni tra tassi di raccolta, composizione chimica delle batterie e decisioni di allocazione tra riciclo e riutilizzo. Gli scenari che considerano sono quattro, ovvero incremento del tasso di raccolta e come influenza recupero di litio, nichel e cobalto,

influenza della composizione delle batterie sulla quantità di materiali recuperati, effetto dell'aumento del riutilizzo sulla domanda di materie prime vergini, trade-off tra riciclo e riutilizzo e relativo impatto sui volumi di materie prime recuperabili. Hanno concluso che il tasso di raccolta influenza direttamente il recupero dei materiali e aumentarlo dal 50% al 90% può incrementare il recupero di litio, nichel e cobalto fino al 17% rispetto alla domanda totale; il riutilizzo delle batterie per stoccaggio energetico può ridurre la necessità di nuove LIB del 20% entro il 2030; riutilizzare di più crea minore necessità di nuove batterie, ma minore disponibilità di materiali riciclati, mentre maggiore riciclo significa recupero immediato di nichel, litio e cobalto ma necessità di produzione di nuove batterie per applicazioni stazionarie. La disponibilità di infrastrutture di raccolta e trattamento è quindi un fattore chiave perché se esse sono costruite nel modo giusto e con i giusti investimenti possono aumentare l'efficienza di gestione della filiera e affievolire le barriere che ostacolano lo sviluppo dell'economia circolare nel settore.

Ojha, Agarwal (2024) hanno analizzato le implicazioni della produzione e del consumo circolare delle batterie per veicoli elettrici sulla sostenibilità delle risorse naturali. Il loro obiettivo è stato valutare come diverse strategie di economia circolare, come il riciclo, il riutilizzo o il remanufacturing possano ridurre la dipendenza dai materiali vergini e migliorare la sostenibilità del settore. Anch'essi hanno utilizzato un modello di System Dynamics per simulare le dinamiche a lungo termine del sistema e fornire raccomandazioni sulle strategie più efficaci per minimizzare l'impatto ambientale. Nel modello hanno utilizzato il flusso delle batterie nel loro ciclo di vita, l'efficienza della raccolta dei materiali, il ruolo della produzione digitale con l'industria 4.0 e diversi scenari di simulazione per valutare l'effetto delle politiche di economia circolare sui materiali critici. Hanno osservato che se il tasso di raccolta delle batterie passa dal 10% al 75%, la quantità di litio e nichel recuperati aumenta in modo significativo, riducendo la necessità di estrazione mineraria; che l'uso di intelligenza artificiale, internet delle cose e digitalizzazione dei processi consente di ottimizzare la gestione delle batterie migliorando tracciabilità e logistica inversa e che la combinazione di big data e machine learning permette di prevedere il deterioramento delle batterie e massimizzare la loro durata. Oltretutto, se implementati correttamente, i modelli di economia circolare possono ridurre fino al 40% la domanda di litio vergine entro il 2040 e le strategie di ottimizzazione della supply chain possono estendere la vita utile delle batterie di oltre il 30%, diminuendo la necessità di nuove batterie. Il modello quindi si concentra sul ruolo dell'efficienza della raccolta nel riciclo, dato che la percentuale di batterie raccolte è una variabile critica per determinare la disponibilità di materiali secondari per la produzione di nuove batterie, sul trade-off tra riciclo e riutilizzo, sul ruolo dell'industria 4.0 e sulle prospettive a lungo termine per la sostenibilità delle materie prime.

Yang et al. (2020), infine, studiano il riciclo ed il riutilizzo delle batterie per veicoli elettrici all'interno di una supply chain a ciclo chiuso in Cina, per comprendere il ruolo della cooperazione tra aziende nel migliorare l'efficienza del sistema di recupero delle batterie e ottimizzare il loro riciclo e riutilizzo. Per farlo, sviluppano un modello di System Dynamics che simula diverse strategie di gestione delle batterie a fine vita e valuta i benefici economici della collaborazione delle imprese.

Il modello presenta due scenari, ovvero uno in cui si ha uno sviluppo indipendente delle imprese, senza cooperazione tra attori, e uno in cui si ha collaborazione per migliorare il livello tecnologico e l'efficienza del sistema. I risultati dimostrano che senza cooperazione il livello tecnologico rimane costante, il progresso si dimostra lento e le aziende locali rimangono poco competitive , mentre con cooperazione il livello tecnologico migliora del 10-15% in poco tempo, aumentando margini di profitto e riducendo i costi operativi. Se poi il tasso di raccolta delle batterie è inferiore al 50%, la quantità di batterie disponibili per il riutilizzo diminuisce drasticamente, rendendo il sistema meno sostenibile; se invece supera il 70% il sistema diventa più resiliente. Oltretutto, migliorando raccolta e riciclo, è possibile ridurre la domanda di litio, nichel e cobalto fino al 30% entro il 2035. Anche i sussidi hanno un impatto significativo sulla competitività delle aziende e una loro riduzione potrebbe rendere necessario un maggiore investimento in tecnologie di recupero per mantenere alta la redditività del settore.

Di seguito, nelle tabelle 2 e 3, viene riportata una panoramica dei punti fondamentali emersi da ognuno degli studi analizzati e vengono confrontati su di essi alcuni parametri fondamentali.

Riferimento	**Software SD**	**Focus dell'analisi**
Gao et al. (2024)	Vensim	Impatto delle infrastrutture di ricarica e dei finanziamenti pubblici sulla diffusione di BEV e FCEV.
Shaikh et al. (2023)	AnyLogic	Analisi costi della rigenerazione delle batterie EV rispetto all'acquisto di nuove batterie.
Bhanu et al. (2024)	Vensim	Dinamiche di mercato delle LIB, considerando sussidi, autonomia dei veicoli e chimica delle celle.
Pratap et al. (2024)	Vensim	Recupero materiali critici dalle LIB EOL, confrontando riciclo e riutilizzo.
Ojha et al. (2024)	Stella	Effetti di Industria 4.0 e digitalizzazione sulla gestione circolare delle batterie EV.
Yang et al. (2020)	Vensim	Modellazione della Closed-Loop Supply Chain (CLSC) per il riciclo e riutilizzo delle batterie EV.

Tabella 2: Confronto tra i sei studi basati su System Dynamics nel settore delle batterie per veicoli elettrici (1)

Riferimento	**Orizzonte temporale**	**Confini geografici**	**Tipologia di batteria**	**Approcci circolari**
Gao et al. (2024)	19 anni	Guangzhou, Cina	BEV, FCEV	Nessun focus sull'EOL
Shaikh et al. (2023)	8 + 8 anni (rigenerazione)	Globale (USA, Corea, Cina)	LIBs	Rigenerazione, seconda vita, riciclo menzionato
Bhanu et al. (2024)	15 anni	Globale (USA, Cina, Europa)	NMC622, NMC811, NCA	Nessun focus sull'EOL
Pratap et al. (2024)	15 anni	India	NMC622, NMC811, NCA, LFP	Riciclo e seconda vita (confronto strategico)
Ojha et al. (2024)	20 anni	Globale	LIBs	Riutilizzo diretto, seconda vita, rigenerazione, riciclo
Yang et al. (2020)	9 anni	Cina	LIBs, focus sul litio	Riciclo, riutilizzo progressivo

Tabella 3: Confronto tra i sei studi basati su System Dynamics nel settore delle batterie per veicoli elettrici (2)

Gli studi e le analisi sopra espressi nell'esplicitazione dello stato dell'arte forniscono un buon quadro di quelli che sono i maggiori punti di interesse e di ricerca attuali del settore delle batterie agli ioni di litio per veicoli elettrici e del loro fine vita e ognuno di essi per essere effettivamente sviscerato e studiato a fondo necessiterebbe di sperimentazioni ed osservazione dell'evoluzione del settore nel corso dei prossimi anni a breve e a lungo termine. La presente tesi si pone quindi l'obiettivo di considerare alcuni specifici e mirati aspetti salienti e di attuale interesse nell'ambito della ricerca, con lo scopo di rispondere alle *domande di ricerca* poste alla fine del capitolo dell'introduzione. Propone un modello di System Dynamics adattato al mercato italiano, per simulare il percorso delle batterie dagli impianti di dissassemblaggio fino alle strutture di riciclo, quantificando gli investimenti necessari per affrontare eventuali richieste di aumento di capacità massima trattabile richiesti del settore fino al 2050, cercando di conferire un quadro generale limitatamente alle

ipotesi prese in considerazione nel seguente capitolo della metodologia. Inserendosi nella letteratura inerente il settore, si vogliono studiare diversi scenari per unire simulazioni puramente teoriche con analisi economiche e politiche, fornendo una base per definire alcune strategie sostenibili per il trattamento delle batterie agli ioni di litio.

2.2 La System Dynamics

Il modello utilizzato per svolgere la simulazione su cui si fonda tutto il lavoro della tesi è basato sulla metodologia della System Dynamics, che è anche lo stesso tipo di modellazione utilizzata da tutti i lavori di analisi che sono stati presi in considerazione nello stato dell'arte. Si ritiene quindi doveroso e utile avere una panoramica di come la metodologia funzioni e per che cosa venga solitamente utilizzata, in modo da comprendere il perché è stata scelta per questo lavoro e quali vantaggi ha potuto arrecare allo stesso, grazie alle sue specifiche peculiarità.

La System Dynamics (SD) è una metodologia di modellazione e simulazione sviluppata da Jay Forrester presso il Massachussetts Institute of Technology (MIT) negli anni cinquanta del novecento, che è stata successivamente approfondita e ampliata da numerosi ricercatori, tra i quali John D. Sterman, autore del testo di riferimento *Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World* (Sterman (2000)). La System Dynamics nasce per fornire uno strumento analitico che sia effettivamente in grado di rappresentare sistemi complessi con lo scopo di comprenderli. Per sistemi complessi si intendono sistemi caratterizzati da molte variabili interconnesse, ritardi temporali spesso presenti e strutture dinamiche che rendono difficile prevedere il comportamento futuro degli stessi sistemi con metodologie più tradizionali. L'obiettivo della System Dynamics è quindi quello di comprendere a pieno la struttura sottostante ad un sistema, modellando le relazioni tra le sue componenti nel tempo e consentendo di valutare l'evoluzione di determinati scenari in risposta a determinate politiche o strategie di intervento. A differenza delle analisi statistiche più classiche, che si basano prevalentemente sull'analisi dei dati passati con lo scopo di estrapolare tendenze future, la System Dynamics si basa molto sulla struttura stessa del sistema, mirando a comprendere le cause più profonde che generano i comportamenti, piuttosto che limitarsi a descriverne gli effetti. I concetti chiave preponderanti nella System Dynamics sono:

- **stock**: rappresentano gli accumuli all'interno del sistema e hanno la funzione di conservare la memoria dello stato in cui il sistema si trova. In altre parole, uno stock raccoglie tutte le variazioni che si sono verificate nel tempo a causa dei flussi in ingresso e in uscita. Essi sono quantità misurabili in un dato istante temporale, come ad esempio il numero totale di batterie a fine vita presenti in un sistema. Poiché gli stock si accumulano nel tempo, il loro valore ed il processo di accumulo si descrivono matematicamente con l'integrazione nel tempo dei flussi in ingresso e in uscita. Il valore di uno stock in un dato

istante t viene calcolato secondo la formula:

$$Stock(t) = Stock(t_0) + \int_{t_0}^{t} (Flow_{in} - Flow_{out})\, dt \tag{1}$$

dove *Stock(t)* è il valore dello stock al tempo t, *Stock(t_0)* è il valore iniziale dello stock, $Flow_{in}$ è il flusso in ingresso allo stock, che ne aumenta il valore, $Flow_{out}$ è il flusso in uscita dallo stock, che ne riduce il valore e dt rappresenta un infinitesimo intervallo di tempo in cui si valutano i cambiamenti dello stock. Questa equazione mostra che lo stock non cambia istantaneamente, ma si evolve nel tempo in base alla somma delle variazioni nette dovute ai flussi. L'uso dell'integrazione è poi necessario in quanto i flussi non rimangono sempre costanti nel tempo, ma possono variare rendendo impossibile stimare il valore futuro dello stock con una semplice somma algebrica di tipo discreto. Su AnyLogic, in particolare, ovvero il software che è utilizzato per rappresentare il modello e svolgere le simulazioni nella presente tesi, l'aggiornamento dello stock viene eseguito attraverso la formula:

$$Stock(t + \Delta t) = Stock(t) + (Flow_{in}(t) - Flow_{out}(t)) \cdot \Delta t \tag{2}$$

dove Δt è il passo temporale della simulazione (1 anno ad esempio, come nel caso di questa analisi) e il valore dello stock viene aggiornato aggiungendo la variazione netta data dai flussi e moltiplicata per il passo temporale stesso;

- **flow**: rappresentano le variazioni degli stock nel tempo. Sono le grandezze che determinano il vero e proprio ritmo di incremento o decremento di uno stock e possono essere interpretati come "velocità di cambiamento". Esempi di flussi nel modello di questo studio possono essere il flusso in ingresso delle batterie a fine vita (equazione 7), ovvero il numero di batterie che raggiungono l'end-of-life ogni anno, o il flusso di riciclo delle batterie (equazioni 11 e 14), ovvero il numero di batterie che ogni anno possono entrare negli impianti di riciclo per essere trattate.

- **dinamiche di ritardo**: in molti sistemi reali gli effetti di una decisione o di un evento non sono immediati, ma si manifestano con un certo ritardo. I delay conseguenti a questo fenomeno possono essere modellati come si può osservare nell'appendice A.1;

- **loop di retroazione**: regolano il comportamento dinamico del sistema nel tempo e si dividono in *loop di rinforzo*, che amplificano un fenomeno e in *loop di bilanciamento*, che contrastano i cambiamenti e stabilizzano il sistema, impedendo che una variabile cresca o diminuisca senza controllo. Un esempio di loop rinforzante può essere un'industria che investe nel riciclo delle batterie, la quale con il tempo migliora la propria efficienza riducendo i costi ed incentivando ulteriori investimenti, generando un ciclo positivo. Un esempio di loop bilanciante invece può essere la regolazione della capacità di riciclo: se il numero di batterie a fine vita supera la capacità degli impianti, si verifica un accumulo di batterie non trattate. Questo può spingere ad aumentare gli investimenti in nuovi impianti, i quali a loro volta ridurranno l'accumulo riportando il sistema all'equilibrio.

La System Dynamics è stata scelta come approccio metodologico per sviluppare la presente tesi in quanto consente di modellare e simulare il comportamento di un sistema complesso e dinamico come quello della gestione della fine vita delle batterie agli ioni di litio riuscendo a conciliare tra loro diverse variabili e diversi parametri fondamentali ed avendo un buon quadro generale del sistema per poterne simulare agevolmente diversi scenari. Il settore del riciclo e del trattamento delle batterie è infatti caratterizzato da molteplici variabili interconnesse, ritardi nelle risposte del sistema e grande incertezza sui futuri scenari normativi ed economici. La System Dynamics permette di gestire tutti questi fattori in maniera opportuna e di fornire un modello quantitativo per analizzare il futuro del settore e supportare la transizione verso un'economia circolare delle batterie agli ioni di litio e sugli investimenti che sarà necessario sostenere per ottimizzarne la gestione.

3 Metodologia

Per rappresentare la situazione studiata e riuscire a simulare gli scenari in analisi, si è utilizzato un **modello in System Dynamics**, che potesse aiutare ad ottenere una visione d'insieme della problematica affrontata nell'arco di quarant'anni, prendendo in input i veicoli elettrici che nel mercato italiano sono entrati ed entreranno sino al 2050. Si è supposto di considerare per ogni veicolo un pacco batteria unico e identificativo del veicolo stesso. I flussi del modello e gli stock considerano i kWh corrispondenti alla capacità delle batterie che scorrono all'interno del sistema e l'unità di misura principale di riferimento di tutta la simulazione sarà l'energia. L'output del modello sono quindi i kWh (corrispondenti ai relativi pacchi batteria) che potenzialmente dovranno essere riciclati sino al 2050, tenendo conto di dati accurati fino al giorno d'oggi e previsioni per il futuro. Si tiene conto anche della capacità riciclabile annualmente dagli impianti presenti in Italia e successivamente si potrà constatare quanti impianti dovranno essere costruiti per far fronte alla domanda di riciclo anno per anno, basandosi su un gap di tra la capacità necessaria e quella presente che si è propensi ad andare più o meno a colmare in base ai fondi dedicati a tali operazioni nel Paese. Vengono poi simulati principalmente tre scenari di mercato, ovvero:

1. **BAU: Business As Usual**, che assume un'adozione progressiva ma non accelerata dei veicoli elettrici, senza politiche drastiche per eliminare i veicoli con motore a combustione interna. Il mercato dei veicoli elettrici cresce in modo organico, influenzato principalmente dalle tendenze economiche e tecnologiche;

2. **ICE BAN**, che assume che i veicoli con motore a combustione interna (Internal Combustion Engine - ICE) vengano progressivamente eliminati dal mercato, con un divieto totale di vendita entro il 2035. Questo porta a un'adozione molto più rapida dei veicoli elettrici, aumentando significativamente il numero di batterie che raggiungono la fine del loro primo ciclo di vita;

3. **NET ZERO**, che prevede una transizione accelerata verso l'elettrificazione dei trasporti per raggiungere emissioni nette pari a zero entro il 2050. L'adozione dei veicoli elettrici cresce rapidamente, ma non così drasticamente come nell'ICE BAN. La domanda di materiali riciclati per le batterie è alta, ma le politiche favoriscono un equilibrio tra riciclo e riuso delle batterie.

La scelta di questi scenari è coerente con quelli analizzati da Seika, Kubli (2024) e vuole cercare di rappresentare al meglio diversi contesti che potrebbero verificarsi, con lo scopo di avere uno spettro più ampio di possibilità e una conseguente analisi di costi ed investimenti associati alla gestione della fine vita delle batterie agli ioni di litio, per poterli confrontare tra loro.

Successivamente, è stato utilizzato un **modello di ottimizzazione lineare** che prendesse in input le capacità in costruzione ed effettivamente costruite in

modo cumulato fino al 2050, provenienti dall'output della simulazione, per capire quale fosse il costo effettivo degli investimenti e dei costi variabili relativi agli impianti di riciclaggio delle batterie e agli impianti di disassemblaggio delle stesse idonei a far fronte alla domanda effettiva. L'output di tale modello è il vero oggetto di confronto tra i diversi scenari analizzati, potendo far capire quando ognuno di essi potrebbe gravare sulle finanze dello stato sulla base delle politiche imposte sul riciclaggio delle batterie e sull'utilizzo di veicoli elettrici dall'Unione Europea.

3.1 Il modello in System Dynamics

Il modello in System Dynamics destinato alla simulazione dei diversi scenari è stato costruito tramite Anylogic, ovvero un software di simulazione multi-metodo sviluppato da The AnyLogic Company. È uno degli strumenti più avanzati per la modellazione di sistemi complessi, in quanto permette di combinare tre diversi paradigmi di simulazione:

- **System Dynamics (SD)**, utilizzato per modellare sistemi a livello macro, come la crescita del mercato o la diffusione di tecnologie, utile nel nostro caso specifico di analisi;
- **Agent-Based Modeling (ABM)**, adatto alla simulazione di sistemi decentralizzati in cui agenti autonomi interagiscono tra loro, come nei modelli di comportamento umano o di traffico;
- **Discrete Event Simulation (DES)**, ideale per simulare processi che si basano su eventi discreti, come le operazioni in una catena di montaggio o la gestione delle code in un servizio.

Nonostante il modello sia stato creato quasi esclusivamente seguendo le regole e le dinamiche tipiche della SD, sono stati utilizzati anche degli strumenti appartenenti alla classe agent-based, come ad esempio il blocco *funzioni* o il blocco *variabile*, che differisce dalla *variabile dinamica* della SD in quanto la seconda si aggiorna automaticamente man mano che prosegue il tempo di simulazione, mentre la prima si aggiorna secondo la verifica di una condizione espressa esplicitamente tramite codice da parte del programmatore.

Il modello di base, soprattutto inerentemente ai primi stock e flow, ovvero quelli che fanno riferimento all'entrata effettiva di autovetture elettriche nel mercato e al raggiungimento del loro fine vita sino ad arrivare al momento del riciclo vero e proprio, è ispirato al modello di simulazione creato da Seika, Kubli (2024) nel loro studio sulla End-Of-Life delle batterie agli ioni di litio e confronto tra riciclo e riutilizzo stazionario delle batterie. Tale modello, che funge da base per il successivo sviluppo, è stato modificato e adattato alle esigenze di questo studio, con l'aggiunta di stock e flow e variabili aggiuntive, oltre ad un modello aggiuntivo per simulare gli

investimenti (Sterman (2000)). Ogni scenario sarà rappresentato da una simulazione di quarant'anni, partendo dal 2010 e quindi con dati certi e conosciuti e sino ad arrivare al 2050. La scelta del 2050 come anno sino al quale simulare non è casuale, infatti:

- l'Unione Europea ha fissato il 2050 come traguardo per il raggiungimento della neutralità climatica (European Green Deal). Questo implica un incremento significativo del numero di veicoli elettrici (EV) e, di conseguenza, del numero di batterie a fine vita, rendendo il 2050 un punto critico per analizzare le esigenze di riciclo e gestione delle risorse;
- Si prevede che il picco del fine vita delle batterie EV avverrà tra il 2040 e il 2050, quando gran parte dei veicoli venduti tra il 2020 e il 2035 arriveranno alla fine del loro ciclo di vita. Questo periodo è fondamentale per capire le necessità di riciclo e investimenti nelle infrastrutture di gestione delle batterie;
- La modellazione in System Dynamics è spesso usata per previsioni di lungo periodo, specialmente in settori con grandi cambiamenti infrastrutturali. Un periodo di analisi fino al 2050 è sufficiente per vedere gli effetti di politiche, investimenti e cambiamenti tecnologici, senza essere troppo lontano da perdere validità previsiva.

L'immagine 1 mostra il modello in System Dynamics nel suo insieme e nella sua complessità, che successivamente si andrà a sviscerare in ogni singolo stock e flow, con lo scopo di spiegare come effettivamente si riesce a ricreare una simulazione efficace dei diversi scenari.

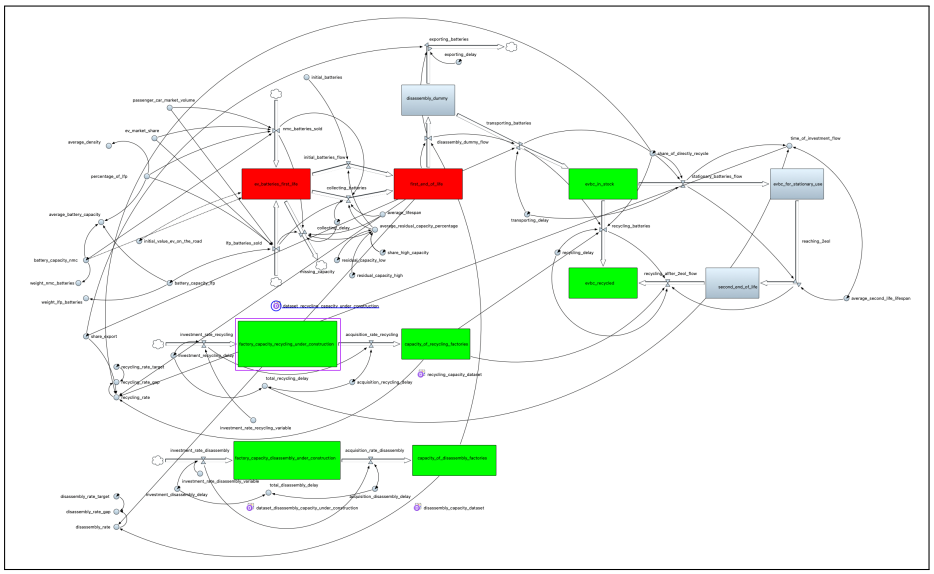


Figura 1: Modello SD intero

Il modello è espresso in anni, quindi tutte le equazioni che si trovano nei flussi fanno riferimento a un valore specifico sull'orizzonte temporale di un anno. Su

AnyLogic tra un anno e l'altro il raggiungimento del valore successivo non è discreto ma continuo e viene fatta un'interpolazione costante dal valore dell'anno precedente sino al valore dell'anno successivo, con il tempo che scorre in modo continuo.

3.1.1 Capacity model: mercato dei veicoli elettrici e primo fine vita

La figura 2 mostra la prima parte del modello realizzato in System Dynamics, in cui si possono osservare gli stock e i flussi relativi all'arrivo delle batterie sul mercato, al loro fine vita e all'operazione di disassemblaggio.

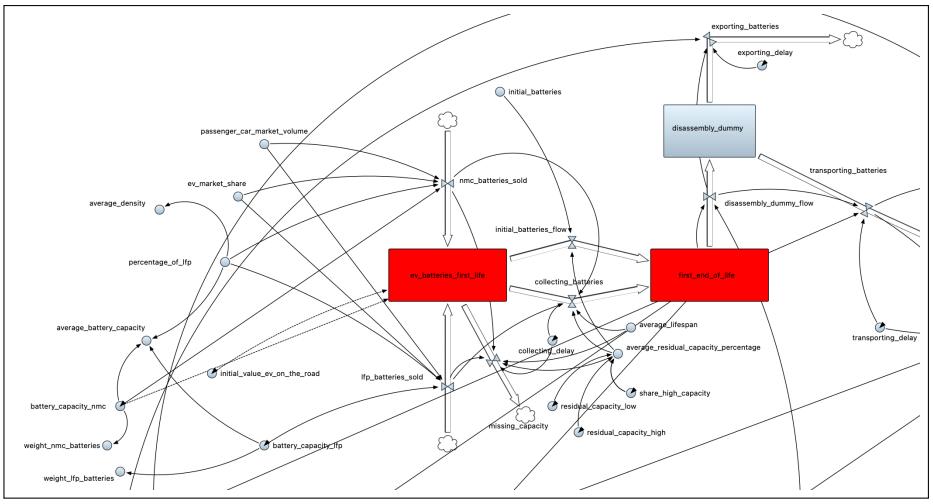


Figura 2: Modello da batterie sul mercato a fine prima vita

Nota iniziale Durante tutta la spiegazione dei modelli verranno esplicitate equazioni dei flussi presenti in relazione ad altri flussi o altri stock. Tutte queste entità variano allo scorrere del tempo della simulazione come flusso(t) o stock(t) dipendenti dal tempo. È stato volutamente inserito ogni volta solo il nome del flusso o dello stock senza la parentesi successiva "(t)" in modo da rendere il tutto più leggibile e leggero nella stesura. Che il lettore ne abbia però consapevolezza.

Ev batteries first life stock In questa prima parte di modello osserviamo l'andamento del mercato dei veicoli elettrici nello scenario italiano, dal 2010 al 2050, utilizzando lo stock *ev batteries first life*, che raggruppa al suo interno tutti i veicoli elettrici che sono presenti sul mercato italiano anno per anno, andando ad aggiornarsi man mano tramite i flussi in ingresso e quelli in uscita. Lo stock possiede un valore iniziale in kWh, corrispondente al numero di veicoli elettrici presenti sul mercato italiano nel 2010, che ha un valore di 116 veicoli, basandosi sui dati ottenuti dalla sezione immatricolazioni del sito UNRAE (Unione Nazionale Rappresentanti di Autovetture Estere). Inizialmente sul mercato sono presenti solamente veicoli possedenti batterie NMC (nichel, manganese, cobalto), dato che sono quelle a maggiore

densità energetica e che venivano utilizzate prevalentemente per gli autoveicoli. La capacità energetica di tali batterie durante la loro prima vita è di 62 kWh a pacco batteria e perciò è così possibile ottenere la capacità iniziale presente sul mercato nel 2010, ovvero $62\,\frac{kWh}{battery}\,\cdot\,116\,batteries = 7192\,kWh$.

I flussi in input al modello Gli input dello stock sono invece due flussi che rappresentano quante batterie, sempre in termini di capacità in kWh, vengono inserite nel mercato anno per anno come batterie di tipo NMC e batterie di tipo LFP. Si ipotizza infatti che nel corso degli anni ci sarà una sostituzione progressiva di batterie, che inizialmente sono completamente del primo tipo, mentre quelle del secondo subentreranno in maniera sempre più intensa.

Le batterie NMC (nichel, manganese, cobalto) sono caratterizzate da una densità energetica elevata, che si attesta generalmente intorno a $200\frac{kWh}{t}$, garantendo un'autonomia maggiore per i veicoli elettrici rispetto alle LFP (litio, ferro, fosfato), la cui densità energetica si aggira intorno a $160\frac{kWh}{t}$ (Bianchetti et al. (2023)). Tuttavia, questa superiorità prestazionale è bilanciata da una minore durata del ciclo di vita, con un numero di cicli di carica/scarica che oscilla tra 1.000 e 2.300, mentre le batterie LFP possono superare i 3.000 cicli, cosa che le rende più longeve e particolarmente adatte per applicazioni che richiedono un uso intensivo, come trasporto pubblico e flotte aziendali (Gailani et al. (2020)). Un altro aspetto fondamentale riguarda la sicurezza: le batterie NMC, pur offrendo elevate prestazioni, sono più soggette a fenomeni di instabilità termica, aumentando il rischio di surriscaldamento e incendi, specialmente in condizioni di stress elevato o danni meccanici. Al contrario, le LFP sono considerate significativamente più sicure, grazie alla loro maggiore stabilità termica, che riduce il rischio di combustione spontanea e ne facilita l'integrazione in veicoli di fascia media e bassa. Dal punto di vista economico, la produzione delle batterie NMC è più costosa a causa della presenza di materiali critici come nichel e cobalto, il cui approvvigionamento è soggetto a fluttuazioni di mercato e a problematiche etiche. Un aspetto infatti critico che sta accelerando la transizione verso le batterie LFP riguarda le implicazioni etiche e ambientali legate all'estrazione del cobalto, un componente chiave nelle batterie NMC. La Repubblica Democratica del Congo (RDC) è il principale produttore mondiale di cobalto, fornendo circa il 70 per cento della produzione globale (Bank (2022)). Le batterie LFP, invece, non contengono cobalto né nichel e utilizzano materiali abbondanti come ferro e fosfato, riducendo i costi di produzione. Numerosi rapporti hanno evidenziato gravi violazioni dei diritti umani nelle miniere di cobalto della RDC, dove si registrano condizioni di lavoro estreme, sfruttamento minorile e rischi sanitari elevati (Amnesty International (2016)). Inoltre, le pratiche minerarie hanno un impatto ambientale significativo, contribuendo alla contaminazione del suolo e delle falde acquifere. Di conseguenza, la riduzione della dipendenza dal cobalto rappresenta un obiettivo prioritario per molte aziende automobilistiche e governi, che stanno incentivando la produzione e l'adozione di batterie LFP come alternativa sostenibile. La sostituzione progressiva delle batterie NMC con le LFP è determinata quindi, riassumendo, da una serie di fattori:

- **riduzione della dipendenza da materiali critici**: l'eliminazione del cobalto e del nichel riduce il rischio geopolitico e le incertezze legate alla volatilità del mercato delle materie prime;
- **maggiore sicurezza**: la stabilità termica delle batterie LFP ne facilita l'utilizzo in veicoli destinati a un uso quotidiano, riducendo i rischi associati a surriscaldamento e incendi;
- **durata superiore**: la possibilità di effettuare un numero maggiore di cicli di ricarica senza un significativo degrado delle prestazioni rende le LFP più economiche sul lungo periodo, soprattutto per applicazioni come flotte aziendali e trasporto pubblico (Gailani et al. (2020)).
- **sostenibilità ambientale**: l'assenza di materiali critici riduce l'impatto ambientale della produzione e dello smaltimento delle batterie, contribuendo a un'economia più circolare (Agency (2022)).

Per rappresentare quindi nel modello i flussi di input, ovvero *lfp batteries sold* e *nmc batteries sold*, è necessario capire quale sia la percentuale di sostituzione delle batterie LFP rispetto alle NMC sul totale delle batterie presenti sino a fine simulazione. Bianchetti et al. (2023) forniscono una panoramica del possibile share di sostituzione, presentato in tabella 4.

Tabella 4: Sostituzione di batterie NMC con LFP (Bianchetti et al. (2023))

Anno	**Percentuale**
2010	0%
2020	7%
2021	15%
2030	35%

Successivamente, bisogna conoscere il fattore di conversione per passare da batteria a kWh, come visto in precedenza per il valore iniziale di capacità presente nello stock *ev batteries first life*. Per quanto riguarda le batterie NMC, si conosce il valore della densità nel 2010, ovvero $62\frac{kWh}{battery}$, che dal 2030 giungerà al valore di $75\frac{kWh}{battery}$. Per trovare i valori corrispondenti per le batterie LFP si sono utilizzati i valori delle densità energetiche medie delle due batterie, ovvero $200\frac{kWh}{t}$ (NMC) e $160\frac{kWh}{t}$ (LFP). Si è utilizzata la proporzione $200\,\frac{kWh}{t} : 160\,\frac{kWh}{t} = 62\,\frac{kWh}{battery} : x$, dove x rappresenta il valore di capacità per una singola batteria LFP nel 2010. La stessa proporzione è stata eseguita con il valore di $75\frac{kWh}{battery}$ del 2030 e si sono ottenuti i valori di capacità per le batterie LFP, che sono rispettivamente di $49.6\,\frac{kWh}{battery}$ dal 2010 al 2030 e di $60\,\frac{kWh}{battery}$ dal 2030 al 2050. Un'altra cosa da tenere in considerazione per i due flussi di input al modello è la quantità di veicoli elettrici effettivamente presenti in Italia. I dati sul totale dei veicoli immatricolati in Italia dal 2010 al 2029 sono stati presi dal sito di Statista, mentre i valori successivi sono stati ipotizzati e previsti su Microsoft Excel tramite un modello di regressione lineare, attraverso lo

strumento "analisi dati". La linearità dell'andamento del mercato è stata supposta in quanto su Seika, Kubli (2024) sono presenti i dati sino al 2050 del mercato svizzero e l'andamento del mercato italiano, geograficamente molto vicino, presenta una forma analoga come andamento seguendo un modello regressivo lineare come quello applicato. Lo share di veicoli elettrici sul totale di veicoli è invece stato fornito da BFS, Astra (2023) e da Prognos et al. (2021), distinguendo da scenario BAU, ICE BAN e NET ZERO, così come distinti ed esplicitati sopra. Di seguito, in tabella 5 è presentato il volume del mercato automobilistico italiano anno per anno, in termini di autovetture elettriche entranti nelle strade italiane.

Tabella 5: Volume del mercato automobilistico italiano

Anno	**Numero auto**
2010	1,960,282
2011	1,748,143
2012	1,402,089
2013	1,303,534
2014	1,359,616
2015	1,567,000
2016	1,804,000
2017	1,944,000
2018	1,941,000
2019	1,901,000
2020	1,382,000
2021	1,495,000
2022	1,129,000
2023	1,562,000
2024	1,845,000
2025	1,896,000
2026	1,820,000
2027	1,725,000
2028	1,756,000
2029	1,813,000
2030	1,744,019
2031	1,751,289
2032	1,758,559
2033	1,765,829
2034	1,773,099
2035	1,780,369
2036	1,787,639
2037	1,794,909
2038	1,802,179
2039	1,809,449
2040	1,816,719
2041	1,823,989
2042	1,831,259
2043	1,838,529
2044	1,845,799
2045	1,853,069
2046	1,860,339
2047	1,867,609
2048	1,874,879
2049	1,882,149
2050	1,889,419

Ottenuti tutti i dati sopracitati è quindi possibile andare a definire effetti-

vamente le equazioni dei due flussi di input al modello:

$$lfp\ batteries\ volume = market\,volume \cdot ev\,share \cdot capacity\,lfp \cdot lfp\% \quad (3)$$

$$nmc\ batteries\ volume = market\,volume \cdot ev\,share \cdot capacity\,nmc \cdot (1 - lfp\%) \quad (4)$$

dove *market volume* rappresenta il volume di mercato delle automobili italiane nell'anno, *ev share* la percentuale delle automobili totali che sono elettriche in base allo scenario considerato (BAU, NET ZERO, ICE BAN), *capacity xxx* la capacità in kWh presente in una batteria e *lfp%* la percentuale di sostituzione delle batterie NMC con le LFP nel corso del tempo. D'ora in poi tutti i flussi e gli stock considerano i kWh come unità di misura, rappresentando i flussi di energia delle capacità delle batterie che percorrono tutta la loro vita dall'entrata nel mercato al riciclo finale.

I flussi collecting batteries e initial batteries e lo stock della first end-of-life Una volta che le batterie raggiungono il mercato ed entrano effettivamente, tramite i veicoli elettrici, nella quotidianità degli utenti italiani, rimangono in strada per tutta la durata della loro prima vita. È proprio la durata media della vita delle batterie che risulta essere il presupposto per la creazione dei flussi che escono dallo stock *ev batteries first life*, ovvero *collecting batteries* e *initial batteries flow*. La vita media delle batterie agli ioni di litio è ipotizzata essere la medesima sia per i pacchi batteria NMC che per quelli LFP. I valori della vita media delle batterie vengono espressi tramite una funzione di probabilità di Weibull di cui i parametri di scala e forma sono forniti da Seika, Kubli (2024). La funzione di Weibull è una distribuzione statistica utilizzata per modellare il tempo di vita di un sistema o di un componente soggetto a guasti o decadimento. È ampiamente impiegata in ambiti come l'affidabilità, la manutenzione predittiva e la simulazione di processi di degrado, tra cui il ciclo di vita delle batterie agli ioni di litio nei veicoli elettrici. La funzione di densità di probabilità della distribuzione di Weibull è definita come:

$$f(t) = \frac{k}{\lambda}\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(t\lambda)^k} \quad (5)$$

dove:

- t è il tempo o la variabile casuale che si sta analizzando;
- λ (scala) è il parametro di scala che determina la dispersione dei dati; controlla la grandezza della distribuzione. Un valore più alto di λ sposta la distribuzione verso destra, indicando una maggiore durata media prima del guasto o della fine della vita utile;
- k (forma) è il parametro di forma che caratterizza il comportamento della funzione. Determina la modalità del decadimento:
  - Se $k < 1$, la distribuzione mostra un tasso di guasto decrescente nel tempo, tipico di sistemi soggetti a mortalità infantile o difetti di fabbrica;

- Se $k = 1$, la distribuzione si riduce alla funzione esponenziale, rappresentando un tasso di guasto costante nel tempo;
- Se $k > 1$, il tasso di guasto cresce nel tempo, caratterizzando fenomeni di usura progressiva (caso delle batterie EOL).

Nel contesto delle batterie agli ioni di litio, la distribuzione di Weibull viene utilizzata per modellare il tasso di ritiro dal mercato e il degrado delle batterie, consentendo di stimare il momento in cui una batteria raggiunge la sua fine vita sulla base della sua capacità residua. I parametri di Weibull a disposizione coprono un arco temporale che va dal 2010 al 2040, con la forma che rimane sempre costante mentre la scala aumenta gradualmente, stando ad indicare che ci sarà un aumento della vita media prima del guasto delle batterie. I valori di scala sino al 2050 sono stati ipotizzati in modo da garantire rendimenti marginali decrescenti in quanto, man mano che si ottengono miglioramenti tecnologici, si tende asintoticamente verso una saturazione oltre la quale il gap colmabile tra attuale tecnologia e massima raggiungibile con gli strumenti a disposizione sarà così labile da poter essere ignorato. I valori riportati di scala e forma sono esplicitati in tabella 6.

Tabella 6: Parametri di Weibull

Anno di costruzione	**Scala**	**Forma**
2010	5.23	5
2015	7.12	5
2020	9.02	5
2025	10.44	5
2030	11.41	5
2035	11.88	5
2040	12	5
2045	12.1	5

Possedendo scala e forma della distribuzione di Weibull è possibile calcolare la durata della vita media delle batterie con la seguente formula, che rappresenta il valore atteso della distribuzione:

$$E(t) = \lambda \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \tag{6}$$

con Γ che è la funzione Gamma di Eulero, utile per rappresentare un'estensione del concetto di fattoriale ai numeri reali e complessi. Così facendo si ottengono i valori della vita media in anni che le batterie avranno in base all'anno di costruzione delle stesse, espressi in tabella 7.

Tabella 7: Vita media delle batterie

Anno di costruzione	**Vita media [anni]**
2010	4.8
2015	6.5
2020	8.2
2025	9.6
2030	10.5
2035	10.9
2040	11.0
2045	11.1

Un'altra cosa fondamentale da considerare è che, quando raggiungono il loro primo fine vita, le batterie non posseggono più la medesima capacità di cui disponevano all'inizio della loro vita. Esse hanno un valore di capacità che è compreso tra il 50% e l'80% del valore di capacità iniziale, perciò si è considerato un valore aggregato di diminuzione di capacità che fosse ponderato sulla probabilità che avesse una batteria di essere di buona o di discreta qualità una volta raggiunto questo stadio. La probabilità che la batteria fosse di buona qualità (intorno all'80% della capacità iniziale) si attesta intorno all'80%, mentre il 20% circa è di discreta qualità (50% della capacità iniziale)(Seika, Kubli (2024)). La percentuale che considera perciò la perdita effettiva di capacità delle batterie durante la loro prima vita è calcolato come $P(80\%) \cdot 80\% + P(50\%) \cdot 50\% = 80\% \cdot 80\% + 20\% \cdot 50\% = 74\%$.

Una volta ottenuti quindi i valori della vita media e il fattore di diminuzione di capacità possiamo utilizzarli per la creazione dei flussi in uscita da *ev batteries first life*. Il flusso *initial batteries flow* è stato creato appositamente per simulare il deperimento delle batterie che erano già sul mercato all'inizio dell'orizzonte temporale di riferimento, che hanno durata media della vita pari a 4.8 anni. Sono state fatte uscire tutte quindi in un intorno di tale valore, utilizzando una table function che andasse a mantenere un flusso di uscita costante anno per anno pari al numero di batterie inizialmente in stock diviso per la vita media delle batterie fino a che non si fossero tutte guastate. Il flusso *collecting batteries* invece è stato calcolato, tenendo conto del fattore di diminuzione delle batterie, come:

$$collecting\,batteries = delay[0.74 \cdot (lfp\,batteries\,sold + nmc\,batteries\,sold) \cdot (1 - 0.004),\, average\,lifespan + collecting\,delay] \quad (7)$$

L'equazione è ritardata di un valore pari alla vita media delle batterie aggiornata in base all'anno di costruzione delle stesse e considerando anche il ritardo dovuto alla raccolta delle batterie stesse, ovvero 1 mese (Seika, Kubli (2024)), tramite la funzione *delay*3 di AnyLogic (vedi appendice A.1). Il valore di 0.004 (Bianchetti et al. (2023)) è rappresentativo di quel valore di capacità di cui dispongono le batterie a fine vita che non riesce ad essere trasferito agli impianti di raccolta a causa di azioni compiute più o meno volontariamente dagli utilizzatori, i quali potrebbero danneggiare le batterie o gli autoveicoli in cui sono contenute e diminuire leggermente la loro capacità. Viene utilizzato questo valore per tenere conto di queste particolari

situazioni in modo aggregato. Grazie all'ausilio di questi due flussi in output e di quelli in input visti nel paragrafo precedente possiamo andare a osservare l'andamento dello stock ev batteries first life nel corso degli anni, simulando l'entrata delle auto elettriche nel mercato, il tempo in cui esse vengono effettivamente utilizzate per il loro scopo primario e successivamente il momento in cui si approcciano a raggiungere la fine del loro primo ciclo di vita. I flussi *collecting batteries* e *initial batteries flow* fungono poi da input per lo stock successivo, ovvero quello che raggruppa la capacità di batterie arrivate a questo punto, denominato *first end of life*.

È presente anche un flusso chiamato *missing capacity* in output dallo stock *ev batteries first life*, la cui funzione è quella di rappresentare il complementare della capacità rimanente nelle batterie una volta finita la loro prima vita, ovvero la capacità persa delle batterie, dato che quest'ultima non può rimanere all'interno dello stock in quanto ne falserebbe il valore reale, ma non può nemmeno essere inserita in *collecting batteries* in quanto è per definizione persa dalle batterie durante il loro ciclo di vita.

I flussi exporting batteries e transporting batteries Una volta che le batterie hanno raggiunto la fine del loro primo ciclo di vita vengono raccolte in impianti di stoccaggio per poi essere avviate alle operazioni di trattamento. Una volta che le batterie a fine vita vengono raccolte devono essere disassemblate e solo successivamente potranno essere spedite agli impianti di riciclo o utilizzate per altri scopi, come si osserva nei capitoli successivi. Il disassemblaggio delle batterie, pur essendo una pratica che a primo impatto potrebbe sembrare scontata e poco significativa per la simulazione, si rivela in realtà essere uno dei principali colli di bottiglia del sistema in generale ed è anche una delle cause primarie per cui è necessario effettuare degli investimenti nei prossimi anni nel caso in cui le autovetture a batterie elettriche prendano davvero piede sul mercato così come impongono attualmente le ultime normative europee, come ad esempio quelle dell'ICE BAN. La capacità di disassemblaggio annuale in Italia negli anni 2010 era veramente irrisoria, anche a fronte delle poche autovetture di tipo elettrico presenti nella Penisola, ma se con la stessa capacità si dovesse giungere sino al 2050 il blocco del sistema che si potrebbe riscontrare sarebbe così elevato da bloccare completamente il processo, facendo occupare tantissimo spazio alle autovetture in obsolescenza, occupando magazzini su magazzini che hanno un costo di costruzione e un costo di mantenimento e di giacenza media sempre crescenti nel corso del tempo. È quindi opportuno andare a modellare i flussi in uscita dallo stock *first end of life* in modo opportuno per rappresentare nel modo corretto questa realtà. I flussi in uscita dallo stock sono due, ovvero *exporting batteries* e *transporting batteries*, ma è necessario anche considerare uno stock *dummy*, ovvero uno stock di ausilio che è utile soprattutto per governare al meglio nei modelli le politiche di investimento. Lo stock *disassembly dummy*, infatti, va ad identificare tutte le batterie disassemblate dopo che hanno raggiunto il loro primo fine vita e ad esso si ha accesso tramite il flusso *disassembly dummy flow*. Questo flusso è quello che tiene in considerazione le batterie che vengono anno per anno disassemblate in base alla capacità massima di disassemblaggio che si ha

in quel determinato periodo. La sua equazione è la seguente:

$$disassembly\,dummy\,flow = min(capacity\,of\,disassembly\,factories,\ first\,end\,of\,life) \quad (8)$$

È importante notare come in questo caso all'interno del flusso si utilizzi un'equazione che faccia riferimento allo stock precedente e non a un flusso di input a tale stock: ciò dipende dalle regole di utilizzo delle funzioni di delay (vedi appendice A.1), che in questo caso non sono appunto presenti. È infatti ipotizzato che all'interno della vita media delle batterie calcolata in collecting batteries sia incluso anche il tempo di disassemblaggio al termine del loro utilizzo, che è trascurabile rispetto all'intera vita dei veicoli stessi.

L'utilizzo dello stock *dummy* è utile per sfruttare al meglio i modelli degli investimenti, permettendo di definire condizioni efficaci su quando esattamente effettuare l'investimento e, soprattutto, sul valore dello stesso. Ipoteticamente, se il modello degli investimenti non fosse esistito, si sarebbe potuto evitare di creare questo stock ausiliario, utilizzando direttamente i flussi di *exporting batteries* e *transporting batteries* collegati allo stock *first end of life*. Tuttavia, la presenza di una funzione di minimo nel flusso antecedente allo stock *dummy* (*disassembly dummy flow*) avrebbe generato confusione nell'aumentare la capacità massima disassemblabile annualmente nel corso del tempo. L'incremento di capacità nel modello di investimento si basa sul valore dello stock *first end of life* al momento dell'investimento; di conseguenza, quando la capacità aumenta, è necessario che anche il modello di base possieda un flusso la cui equazione sia basata su *first end of life*. In questo modo, le batterie effettivamente disassemblabili con la nuova capacità possono essere rimosse dallo stock, che rappresenta il collo di bottiglia. Inoltre, i flussi *exporting batteries* e *transporting batteries* contengono dei ritardi nelle loro equazioni. Per come funziona la funzione di ritardo (vedi Appendice A.1), essi dovrebbero basare il loro comportamento sul flusso *collecting batteries*, antecedente a *first end of life*. Questo porterebbe a ignorare il fatto che, dopo gli investimenti, è possibile disassemblare non solo le batterie che raggiungono il loro primo fine vita nell'anno in cui la capacità aumenta, ma anche disassemblare tutte quelle batterie rimaste stoccate negli anni precedenti senza possibilità di essere disassemblate prima. L'introduzione dello stock *dummy* risolve questo problema: il flusso *dummy flow*, non essendo soggetto a ritardi, può collegarsi direttamente allo stock precedente. I flussi in output da *disassembly dummy* possono quindi applicare il ritardo senza violare le regole della funzione di ritardo, garantendo una modellazione più accurata del sistema.

Lo scopo di *exporting batteries* è simulare che possa esserci una quota di batterie (e quindi di capacità) che a fine vita venga esportata all'estero dopo essere stata disassmblata con lo scopo di essere riciclata, non gravando quindi sul numero di batterie da riciclare nel paese di origine. Il flusso è rappresentato come

$$exporting\,batteries = delay(disassembly\,dummy\,flow \cdot\ share\,export,\ exporting\,delay) \quad (9)$$

L'equazione viene ritardata tramite la funzione delay (vedi appendice A.1) del tempo necessario per eseguire la burocrazia preliminare all'esportazione e l'esportazione

stessa, ipotizzato pari a circa tre settimane (norma di buon progetto). La % di export rappresenta la percentuale di batterie a fine vita che viene disassemblata rispetto a quella trattata localmente, andando ad influire pesantemente sugli investimenti da effettuare per costruire impianti di disassemblaggio, come vedremo nella parte di modello dedicata agli stessi. Esportare ci farà risparmiare sugli investimenti in nuovi impianti di riciclaggio ma renderà il Paese meno autonomo e, considerando che l'Unione Europea imporrà sempre di più delle quote obbligatorie di materiali riciclati da utilizzare per costruire le batterie, se non si sarà in grado di riciclarle autonomamente si dovrà sempre dipendere da stati esteri, diminuendo il PIL e l'autonomia del nostro Paese. Oltretutto esportare può avere anche ulteriori spese, ma non è questo al momento il focus principale della simulazione. Per ora, limitiamoci a vedere la quota di esportazioni come un modo per osservare come potrebbe cambiare la capacità richiesta per il riciclo successivo e quella che dovrei andare a costruire in base a quante batterie tengo e quante invece esporto, fornendo quindi un parametro da poter variare per cambiare gli scenari di analisi. Devo anche tenere conto del fatto che la capacità di disassemblaggio delle batterie è come sopra detto limitata inizialmente e quindi posso disassemblare solo un certo numero di batterie in un anno, finché non verranno fatti investimenti sulle capacità di disassemblaggio per diminuire eventuali colli di bottiglia e per risparmiare sui costi di immagazzinamento e stoccaggio. Si possono quindi esportare solo batterie che sono state disassemblate, determinate nel tempo dalla variazione del flusso *disassembly dummy flow*, che fa arrivare nello stock *disassembly dummy* tutte le batterie già disassemblate pronte per essere esportate o riciclate. Come si può quindi osservare, le batterie esportate garantiscono un minore investimento nella creazione di nuovi impianti di riciclo, ma rimanendo inerti e stoccate senza avere una nuova vita finché non è possibile disassemblarle, non portano utilità in quel frangente di tempo a nessuno scopo, quindi né al recupero di materiali critici né alla sostituzione di nuove batterie da dedicare ad utilizzi stazionari. Ecco perché è necessario fare un'accurata analisi prima di decidere se aumentare eccessivamente le quote di esportazioni.

transporting batteries è invece il flusso che rappresenta la quantità di batterie (e quindi di capacità energetica) che, successivamente alla fine della propria prima vita e una volta disassemblate, possono essere stoccate autonomamente per poi essere spedite agli impianti di riciclo o destinate ad esser utilizzate per scopi stazionari (come l'accumulo per pannelli fotovoltaici), in base alla scelta che viene fatta in fase di valutazione. Anche tale scelta va ad incidere sul tempismo in cui effettuare gli investimenti. Ipotizziamo quindi di disporre in un preciso anno, durante la simulazione, di una certa capacità di disassemblaggio massima delle batterie, che è determinata dallo stock *capacity of disassembly factories* che vedremo successivamente nel modello destinato agli investimenti, in relazione all'aumento delle batterie da disassemblare che entreranno sul mercato. Il flusso è espresso dall'equazione:

$$transporting\,batteries = delay[disassembly\,dummy\,flow \cdot (1 - \%export), transporting\,delay] \quad (10)$$

All'equazione viene applicato un ritardo pari al *transporting delay* di 7 giorni (Rosenberg et al. (2023)), ovvero il tempo che ci mette una batteria una volta disassemblata

a giungere poi al magazzino nel quale poi viene deciso cosa fare di essa successivamente. L'idea di base del flusso è quella di osservare le batterie che raggiungono la fine della loro vita in un certo anno e imporre loro che debbano uscire dopo un delay pari al tempo di trasporto utilizzando la funzione delay (vedi appendice A.1). Anche in questo caso il valore della capacità di questo flusso dipende dal flusso *disassembly dummy flow*. Nel caso la capacità di batterie da disassemblare per essere inviate al riciclo sia inferiore della capacità massima disassemblabile, allora tutte quelle entrate escono; se invece la capacità giunta fosse maggiore della capacità massima di batterie disassemblabili attualmente a disposizione uscirebbe solo la capacità massima, contribuendo alla creazione di un collo di bottiglia e al rallentamento del sistema. Gli investimenti che sono effettuati nel corso degli anni, come si potrà notare, andranno ad aumentare la capacità massima e in base alle scelte che verranno prese a riguardo il collo di bottiglia risulterà più o meno preponderante.

3.1.2 Capacity model: riciclo diretto o utilizzo per scopi stazionari

Nella figura seguente (figura 3) viene presentata la parte di modello relativa alle decisioni prese riguardo le batterie una volta che viene deciso di trattenerle nel Paese e non esportarle, e quindi destinarle al riciclo o ad applicazioni di seconda vita.

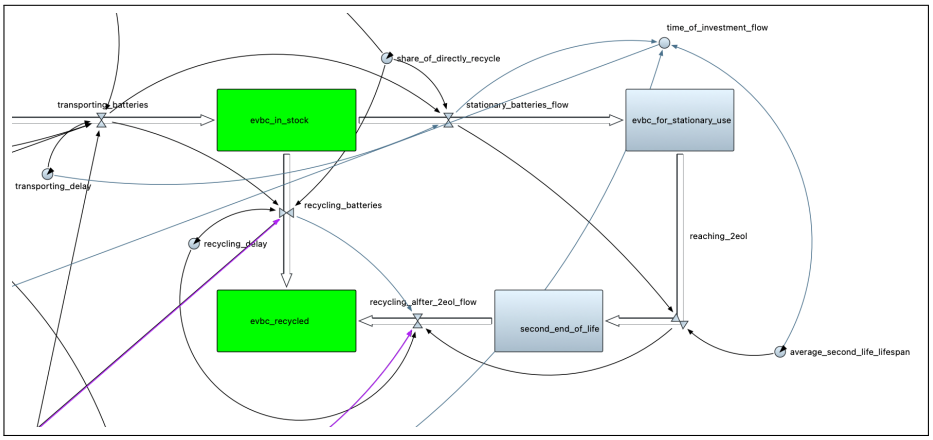


Figura 3: Modello riciclo e riutilizzo

Electric vehicle battery capacity in stock Una volta che le batterie sono state disassemblate raggiungono lo stock *evbc in stock* tramite il flusso *transporting batteries*. A questo punto, tenendo conto del fatto che alla fine tutte le batterie dovranno essere riciclate, è necessario fare una scelta che vada ad influire, più che sulla quantità di investimenti che dovranno essere effettuati per far fronte alla domanda di riciclo, sul tempismo degli stessi. Tutte le batterie devono essere riciclate prima o poi e al giorno d'oggi non è più contemplato lo stoccaggio in discarica.

Il Regolamento (UE) 2023/1542 (European Parliament and Council of the European Union (2023)) del Parlamento Europeo e del Consiglio, entrato in vigore il 18 agosto 2023, stabilisce requisiti stringenti per la gestione delle batterie e dei relativi rifiuti. Questo regolamento abroga la precedente direttiva 2006/66/CE e introduce misure per migliorare la sostenibilità delle batterie lungo tutto il loro ciclo di vita. Le principali ragioni per cui le batterie EV non possono più essere smaltite in discarica sono:

- **impatto ambientale**: le batterie contengono materiali pericolosi che possono contaminare il suolo e le falde acquifere se non gestiti correttamente;
- **recupero di materiali critici**: le batterie sono composte da materiali preziosi come litio, cobalto, nichel e piombo. Il regolamento stabilisce obiettivi specifici per il recupero di questi materiali.

Una volta che le batterie sono stoccate alla fine del loro primo ciclo di vita dispongono di una capacità inferiore alla capacità che avevano inizialmente, così come spiegato precedentemente nell'equazione 7. Tale capacità potrebbe non essere più idonea per applicazioni dinamiche come quelle per cui erano state create inizialmente, ovvero per l'alimentazione di autoveicoli elettrici, ma potrebbe essere ancora sufficiente per utilizzi stazionari, come ad esempio per gli accumulatori di energia presenti nei pannelli fotovoltaici, che saranno sempre più presenti nel nostro Paese negli anni a venire. In base alla domanda di utilizzi stazionari si può quindi ipotizzare una percentuale di batterie stoccate da mandare direttamente in riciclo per avere un istantaneo recupero di materiali critici e una percentuale invece da mandare a svolgere una seconda vita stazionaria. Come avveniva per il disassemblaggio, anche gli impianti di riciclaggio di batterie a inizio simulazione in Italia sono esigui se non quasi inesistenti e quindi anche qui si verifica la stessa situazione che si era verificata precedentemente: se la capacità massima annuale di riciclaggio non venisse aumentata costruendo nuovi impianti, si creerebbe un enorme collo di bottiglia anche in questo punto del sistema e le batterie rimarrebbero stoccate sempre più a lungo nei magazzini portando nuovamente agli stessi problemi visti in precedenza nella fase di disassemblaggio e a problemi nel recupero dei materiali critici. La decisione di mandare una parte di batterie ad essere quindi utilizzate per scopi stazionari al posto che immediatamente riciclate andrà ad incidere sugli investimenti. Le batterie che svolgono una seconda vita arrivano al punto di dover essere riciclate più tardi, e questo può spostare in avanti gli investimenti da effettuare, in quanto una parte di batterie arriva alla seconda fine vita più a lungo termine ed è necessaria meno capacità massima di riciclo nel breve termine. Agendo quindi sul parametro *share of directly recycle*, che identifica la quota direttamente riciclata rispetto a quella mandata a svolgere attività stazionarie, è possibile agire sul timing degli investimenti, ma non sulla loro quota. Vedremo le implicazioni della variabilità di tali parametri analizzando i diversi scenari di simulazione nel capitolo dei risultati e in quello della discussione.

Recycling batteries Il flusso *recycling batteries* tiene conto della quota annuale di batterie che va direttamente in riciclo dopo essere stata disassemblata e stoccata. L'equazione del flusso è molto simile a quella di *transporting batteries*, con la differenza che al posto di considerare la *% export* tiene conto dello *share of directly recycle*. Anch'essa considera l'influenza di un delay (vedi appendice A.1), ovvero del tempo che impiega una singola batteria ad essere riciclata, pari a 1 giorno (Kamath et al. (2023)). Considera anche la capacità massima attualmente riciclabile annualmente con gli impianti a disposizione in quel momento della simulazione (*capacity of recycling factories)*. L'equazione risulta quindi essere:

$$recycling\,batteries = delay[min(transporting\,batteries \cdot share\,of\,directly\,recycle,\, capacity\,of\,recycling\,factories)\,,\, recycling\,delay] \quad (11)$$

Il senso è quello di andare a considerare che possa venire annualmente riciclata tutta la capacità stoccata destinata al riciclo nel momento in cui è inferiore alla capacità massima riciclabile con gli impianti posseduti in quel momento, mentre nel caso sia superiore si andrà a riciclare annualmente un valore pari alla capacità massima annuale prodotta in quel momento.

La seconda vita delle batterie Una parte delle batterie stoccate dopo il disassemblaggio, ovvero la parte complementare rispetto a quella direttamente riciclata e quindi corrispondente al valore stoccato moltiplicato per (1-share of directly recycle), viene inviata a chi la possa utilizzare in modo stazionario.

Il flusso *stationary batteries flow* rappresenta il flusso annuale di tale quota. L'equazione che lo rappresenta è la seguente:

$$stationary\,batteries\,flow = delay[transporting\,batteries \cdot (1 - share\,of\,directly\,recycle),\, transporting\,delay] \quad (12)$$

Si considerano le batterie in ingresso nell'*evbc in stock* in quell'anno e si decide quante mandarne a svolgere una seconda vita per utilizzi stazionari. Viene tenuto conto del delay di trasporto verso i destinatari, posto uguale a quello che serviva per trasportare le batterie in stock dopo averle disassemblate (per la funzione delay guardare l'appendice A.1).

Nello stock *evbc for stationary use* possiamo osservare la capacità energetica delle batterie attualmente in utilizzo per scopi stazionari, ovvero che sta svolgendo effettivamente una seconda vita utile.

Una volta terminata la seconda vita, che dura in media una decina d'anni (e tale valore viene tenuto in considerazione per tutti gli anni di simulazione(Nurdiawati, Agrawal (2022))), le batterie raggiungono il secondo fine vita, rappresentato dallo stock *second end of life*.

Per raggiungere tale stock ci si è avvalsi del flusso *reaching 2eol*, che va a tenere in considerazione le batterie che effettivamente entrano nella loro seconda vita e tramite la funzione di delay3 (vedi appendice A.1) ne simula il tempo che trascorre mentre fungono da fonti di accumulo stazionarie. L'equazione del flusso è

la seguente:

$$reaching\,2eol = delay3(stationary\,batteries\,flow,\ average\,second\,end\,of\,life) \quad (13)$$

Si è poi utilizzato il flusso *recycling after 2eol flow* per andare a rappresentare la quantità di batterie che hanno raggiunto il secondo fine vita che possono essere effettivamente riciclate nel momento in cui arrivano agli impianti di riciclaggio. Quando le batterie arrivano allo stock della second end of life si ipotizza che siano già arrivate agli impianti di riciclo dopo aver finito la loro vita e quindi seconda vita e tempo di trasporto sono entrambi approssimati da *average second end of life*. Questo flusso è rappresentato dalla seguente equazione:

$$recycling\,after\,2eol = delay[min(capacity\,of\,recycling\,factories - recycling\,batteries,\ reaching\,2eol),\ recycling\,delay] \quad (14)$$

In questo caso si deve sempre andare a verificare se la capacità in arrivo agli impianti di riciclo dopo la seconda vita delle batterie sia inferiore o superiore rispetto alla massima capacità di riciclo disponibile con gli impianti presenti in quel momento. In questo caso, però, bisogna tenere conto anche del fatto che la capacità di riciclo disponibile debba essere spartita tra le batterie che devono essere direttamente riciclate dopo la prima vita e quelle che invece arrivano negli impianti dopo essere state utilizzate anche per scopi stazionari. La decisione presa è quella di dare la precedenza alle batterie del primo tipo, in quanto sono quelle che nell'immediato mi permettono di capire all'incirca quanti materiali critici si riescono a recuperare nel momento in cui è stato eseguito il disassemblaggio. Nel momento in cui la capacità sia invece sottoutilizzata una volta che tutte le batterie direttamente destinate al riciclo sono entrate nel processo di lavorazione, allora si può dare spazio anche a quelle ricevute dopo il secondo fine vita. Questo spiega quella parte di equazione che va a considerare la capacità massima disponibile all'anno corrente a cui viene sottratta la quantità presente nel flusso *recycling batteries*, analizzato sopra. Tale differenza rappresenta la quantità di batterie a fine vita che può essere riciclata anno per anno. Viene considerato anche il *recycling delay*, esattamente come nel flusso complementare *recycling batteries*, utilizzando l'apposita funzione di AnyLogic (vedi appendice A.1).

Infine, nello stock *evbc recycled* viene cumulata anno per anno la capacità di batterie che si riesce effettivamente a riciclare, avendo in input i flussi *recycling batteries* e *recycling after reaching 2eol*. Tale stock non ha un output e questo è utile per osservare il valore cumulato di capacità riciclata durante la simulazione. Nel caso si volessero osservare i valori anno per anno è sufficiente creare un dataset che abbia lo scopo di tenere in memoria i valori di capacità riciclata durante la simulazione. Grazie a questo strumento è possibile anche alla fine osservare i valori di ogni stock anno per anno e tramite operazioni di sottrazione anche osservare gli incrementi che ci sono stati tra due annate considerate.

3.1.3 Capacity model: ricapitolazione

Una volta analizzati nel dettaglio tutti gli stock ed i flussi presenti nel modello che va a rappresentare il ciclo di vita completo delle batterie, può essere utile fare una ricapitolazione completa del suo funzionamento in modo discorsivo, per avere una chiara visione d'insieme prima di passare ad analizzare i modelli che permettono di osservare le quantità di investimenti che devono essere effettuati anno per anno per far fronte alla sempre crescente domanda di disassemblaggio e di riciclo, dipendentemente dai vari scenari analizzati e dalla variazione di alcuni parametri fondamentali, come la *%export* o lo *share of directly recycle*.

Ogni anno, con quote crescenti dal 2010 al 2050, una certa quantità di veicoli elettrici entra sul mercato italiano e all'interno di ogni autovettura è presente un pacco batteria, che comincia a svolgere la sua prima vita. Le batterie utilizzate sono suddivise in due tipologie: NMC ed LFP. È presente un fattore di sostituzione che va a considerare che all'inizio siano presenti solo batterie NMC mentre nel corso del tempo, con andamento crescente, una parte di esse saranno sostituite da batterie LFP. Tutte le batterie hanno una vita media, che inizialmente è discretamente bassa, ma man mano che si prosegue con gli anni della simulazione continua ad essere incrementata grazie al progresso tecnologico, allungando il periodo di permanenza in prima vita delle batterie che vengono costruite ed immesse sul mercato negli anni più avanti nel tempo. Una volta che le batterie hanno raggiunto la fine della propria prima vita, vengono estratte dai veicoli ed inviate a degli impianti in cui vengono disassemblate per essere poi stoccate e per decidere quale sorte attribuire loro. Qui bisogna tenere conto di un primo collo di bottiglia che potrebbe essere potenzialmente creato dalla presenza di non sufficienti fabbriche per il disassemblaggio, che devono essere incrementate anno per anno grazie all'allocazione di alcuni investimenti. Le batterie possono essere a quel punto esportate per far sì che le lavorazioni su di esse vengano effettuate in Paesi esteri, oppure mantenute nel paese di origine per essere lavorate internamente. Una volte decisa la quantità da stoccare internamente, ci si trova di fronte a una scelta sul futuro delle batterie: riciclarle direttamente o permettere loro di svolgere una seconda vita. Nel caso vengano riciclate direttamente si può avere un accesso più repentino ai materiali critici come cobalto, nichel, manganese o litio che potranno essere utilizzati per la creazione di nuove batterie, mentre nel secondo caso le batterie possono essere utilizzate per scopi stazionari evitando che ne debbano essere costruite di nuove per gli stessi, permettendo anche di ritardare gli investimenti in impianti di riciclo. Tali investimenti devono essere effettuati in quanto anche per il riciclo, come per il disassemblaggio, ad inizio simulazione sono presenti alcune fabbriche adibite ma il numero delle stesse risulta esiguo rispetto all'aumento ingente di batterie che entrerà nel sistema nel corso degli anni, contribuendo a creare in questo punto un secondo collo di bottiglia. Infine, si può osservare la quantità puntuale o cumulata di capacità energetica di batterie che si è riuscita a riciclare nel corso degli anni, la capacità attualmente in uso per scopi stazionari, la quantità di vetture elettriche presenti sul mercato, le batterie a fine prima vita e a fine seconda vita e la quota di batterie esportate.

3.1.4 Investment model

Introduzione Una volta creato il modello che simula le batterie arrivate sul mercato, l'andamento della loro capacità durante il ciclo di vita e come tale ciclo si sviluppa nel corso degli anni, è possibile andare a creare un modello che rappresenti il flusso degli investimenti in impianti di disassemblaggio e impianti di riciclo che devono essere effettuati per far fronte all'incremento di batterie sul mercato ed evitare di creare eccessivi colli di bottiglia. Il modello degli investimenti è suddiviso a sua volta in due sottomodelli, uno dedicato agli impianti di disassemblaggio e uno dedicato agli impianti di riciclo. I sottomodelli creati sono ispirati ai modelli "*the investor decision structure*" ideati da John Sterman (Sterman (2000)). L'idea di base è quella di andare a simulare quelle che devono essere le capacità aggiuntive trattabili da aggiungere alle imprese del Paese per riuscire a colmare il divario tra capacità massima attualmente disponibile e capacità necessaria per svolgere le operazioni di riciclo e disassemblaggio già esplicitate nel modello di capacità delle batterie. Incrementare la capacità massima significa creare nuovi impianti che possano svolgere le funzioni indicate.

Investimenti per il disassemblaggio Il modello per il disassemblaggio è formato da due stock e due flussi, rappresentati in figura 4.

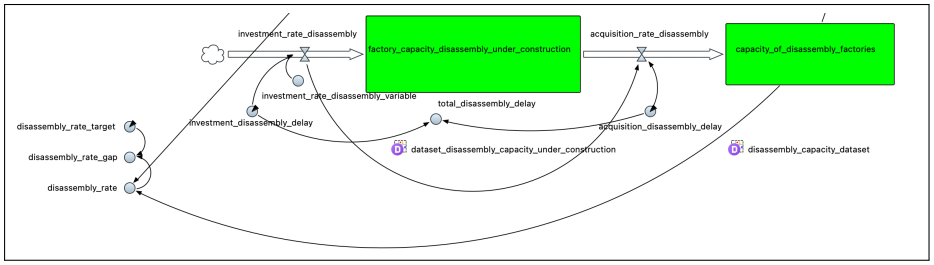


Figura 4: Modello di investimenti per il disassemblaggio

Il primo flusso, quello di input al modello, è *investment rate disassembly*, la cui equazione è:

$$investment\,rate\,disassembly = delay(investment\,rate\,disassembly\,variable,\ investment\,disassembly\,delay) \quad (15)$$

All'interno della variabile di investimento per il disassembly è presente una funzione che va a imporre al modello di investire in nuova capacità ogni volta che sembra nesessario farlo, dipendentemente da un parametro denominato *disassembly rate*. Il *disassembly rate* va ad identificare costantemente il rapporto tra la capacità massima delle batterie attualmente disponibile nel Paese che può essere disassemblata in un anno e la quantità presente nello stock *first end of life*.

$$disassembly\,rate = \frac{capacity\,of\,disassembly\,factories}{first\,end\,of\,life} \quad (16)$$

- se $0 \leq$ *disassembly rate* ≤ 1, significa che solo una parte delle batterie attualmente a fine prima vita possono essere disassemblate annualmente e che c'è una probabilità di avere colli di bottiglia sempre più impattanti proporzionalmente alla diminuzione del rateo;
- se *disassembly rate* > 1, si ha capacità sufficiente per disassemblare tutte le batterie che attualmente hanno raggiunto la fine della propria prima vita.

Viene poi ipotizzato un *disassembly rate target*, ovvero un valore che si desidera ottenere del rateo per essere soddisfatti del processo e per soddisfare in modo più o meno efficace la domanda di disassemblaggio delle batterie. Ad esempio, un *disassembly rate target* di 0.8 significa che si desidera che annualmente l'80 % delle batterie attualmente a fine prima vita possa essere disassemblato per essere inviato all'estero, a svolgere una seconda vita o ad essere direttamente riciclato. Il *disassembly rate gap*, costantemente calcolato, esplica la differenza istantanea tra il *disassembly rate traget* ed il *disassembly rate* ed è il valore tenuto in considerazione dalla funzione *investment rate disassembly function* (vedi appendice A.2) per decidere quando andare ad investire e di conseguenza quanto.

La funzione *investment rate disassembly function*, che prende in input gli anni della simulazione che scorrono man mano che essa prosegue, impone al modello quando è necessario investire e quanta capacità energetica deve essere aggiunta a quella massima attualmente disassemblabile in modo da colmare il gap tra il *disassembly rate* ed il *disassembly rate target*. L'obiettivo è quello di far combaciare il più possibile i due valori in modo da ottenere il target desiderato. La funzione va a controllare con cadenza prestabilita, solitamente uguale alla somma tra il tempo ipotizzato che si pensa possa impiegare l'avvio dell'investimento e il tempo impiegato per costruire i nuovi impianti per aggiungere capacità, quale sia il valore del *dissassembly rate gap* e nel caso sia maggiore di una certa quantità prestabilita impone al modello di effettuare un investimento che vada ad aggiungere alla capacità attualmente disassemblabile (corrispondente a un certo numero di batterie tramite il fattore di conversione della *battery capacity*) la differenza tra la quantità presente nello stock *first end of life* e la *capacity of disassembly factories* attuale.

Tale investimento impiegherà un anno per essere effettuato (ecco il perché del delay presente nel flusso *investment rate disassembly*) per poi raggiungere lo stock *factory capacity disassembly under construction*, che tiene conto anno per anno del numero di fabbriche in costruzione per incrementare la capacità massima di disassemblaggio.

Dopo lo stock delle fabbriche in costruzione è presente il flusso *acquisition rate disassembly*, che impone quello che è il ritardo dovuto al tempo che impiegano le nuove aziende ad essere effettivamente costruite, pari a cinque anni in media (Rosenberg et al. (2023)); trascorso il tempo di costruzione la nuova capacità viene aggiunta a quella precedentemente disponibile come massima nello stock *capacity of disassembly factories*, che una volta aumentato va ad influire sui flussi e sugli stock del *capacity model*, descritti come nei capitoli precedenti. Quando la capacità

aumenta, diventa possibile disassemblare un maggior numero di batterie coerentemente con il target desiderato e con l'aumento delle vetture elettriche presenti sul mercato. Dopo che le fabbriche nuove sono state effettivamente costruite, la funzione *investment rate disassembly function* va a controllare nuovamente il valore del *disassembly rate gap*: se è ancora superiore al valore imposto come limite provvede ad un nuovo investimento, se no controlla in gap anno per anno finché il gap non è di nuovo troppo elevato e a quel punto effettua un nuovo investimento. Il *disassembly rate target* e il valore limite del *disassembly rate gap* risultano essere parametri fondamentali per l'analisi di diversi scenari di simulazione, in quanto la loro variazione influisce pesantemente sull'efficacia del sistema di disassemblaggio italiano e soprattutto sui fondi che è necessario dedicare agli investimenti negli impianti adibiti sulla base della performance che si desidera raggiungere per necessità o perché imposta dalla regolamentazione europea. Successivamente, con un modello di ottimizzazione lineare, è possibile capire quanti impianti vadano costruiti per soddisfare gli investimenti in termini di capacità al 2050 e quale può indicativamente essere l'onere economico degli stessi che vada sostenuto.

Investimenti per il riciclaggio Il modello dedicato agli investimenti per gli impianti di riciclaggio è strutturalmente molto simile a quello sviluppato per gli impianti di disassemblaggio. La configurazione è pressoché identica, con la presenza di due stock e due flussi, del tutto analoghi a quelli del modello precedente, rappresentati in figura 5.

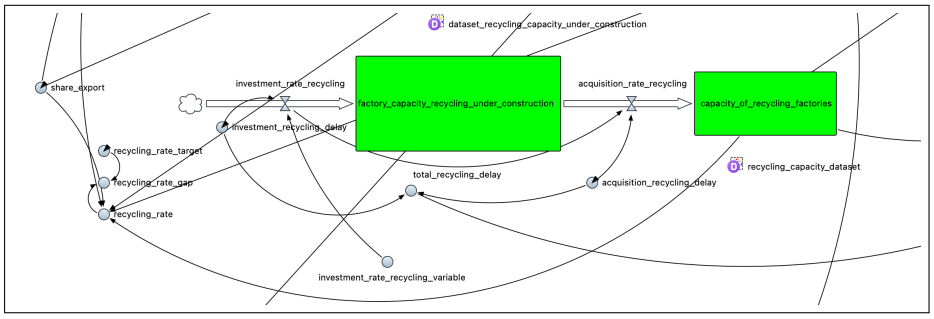


Figura 5: Modello di investimenti per il riciclaggio

Tuttavia, si distinguono per le formule che regolano il *recycle rate* e la funzione *investment rate recycling function* (vedi appendice A.3). Quest'ultima deve considerare non solo le batterie che raggiungono la *first end of life* anno per anno, ma anche la quantità di batterie che viene immediatamente destinata al riciclo e quella che, invece, è avviata a una seconda vita. La possibilità che le batterie vengano riutilizzate per applicazioni stazionarie dopo il primo ciclo di vita implica un effetto di ritardo sugli investimenti necessari per il riciclo. Infatti, se una parte delle batterie viene destinata a una seconda vita, queste dovranno comunque essere riciclate, ma solo dopo aver raggiunto il secondo fine vita, ipotizzato nel modello come pari a circa dieci anni (Nurdiawati, Agrawal (2022)). Di conseguenza, sebbene sia necessario effettuare investimenti per soddisfare la crescente domanda di riciclo,

inizialmente la capacità richiesta potrebbe essere inferiore. Questo perché il numero di batterie che deve essere riciclato immediatamente dopo la prima vita è minore rispetto alla totalità delle batterie disassemblate, al netto della percentuale destinata all'export. Più è basso lo *share of directly recycle*, maggiore è la possibilità di dilazionare nel tempo gli investimenti necessari per far fronte alla crescente domanda di riciclo. Tuttavia, poiché le batterie che hanno concluso la seconda vita dovranno comunque essere trattate, è essenziale pianificare per tempo gli investimenti necessari per soddisfare questa ulteriore domanda, considerando il ritardo di circa dieci anni con cui tali batterie raggiungeranno gli impianti di riciclo. Per tale scopo viene creata la variabile *time of investment flow*, calcolata nel seguente modo:

$$time\,of\,investment\,flow = delay(stationary\,battery\,flow,\ average\,second\,lifespan - total\,recycling\,delay) \quad (17)$$

La variabile viene utilizzata per tenere traccia mediamente del numero di batterie (e quindi di capacità energetica) che giungerà agli impianti di riciclo dopo aver intrapreso un percorso stazionario, ma ciò viene comunicato quando mancano circa sei anni al raggiungimento del secondo fine vita, ovvero quando manca il *total recycling delay*, corrispondente alla somma del tempo necessario per effettuare un investimento (un anno) e il tempo medio di costruzione degli impianti di riciclo (cinque anni, (Rosenberg et al. (2023)). Tale variabile è utile perché quando la funzione *investment rate recycling function* deve andare a decidere di investire, può tenere conto delle batterie che arrivano direttamente dal primo ciclo di vita ma anche di quelle che arrivano potenzialmente dopo il loro secondo ciclo di vita, una volta che le fabbriche di riciclo nuove saranno effettivamente operative per l'utilizzo.

Di conseguenza, il flusso di input per il modello di riciclo, ovvero *investment rate recycling*, viene definito come

$$investment\,rate\,recycling = delay(investment\,rate\,recycling\,variable,\ investment\,recycling\,delay) \quad (18)$$

La variabile *investment rate recycling variable* viene aggiornata tramite la funzione *investment rate recycling variable*, che ha un funzionamento analogo alla *investment rate disassembly variable*, con la differenza che in questo caso viene tenuto conto anche del tempismo con cui le batterie alla fine della loro seconda vita raggiungono gli impianti di riciclo. Anche qui viene creato un *recycling rate* destinato ad indicare il rapporto tra la capacità riciclabile annualmente in un certo periodo rispetto a ciò che si dovrebbe riciclare nello stesso periodo, la cui formula è più complicata rispetto a quella del *disassembly rate* e può essere espressa in due modi differenti in base al fatto che si supponga di trovarsi all'interno di una supply chain integrata (caso preferibile e più efficiente) o non integrata:

1. nel caso in cui ci si trovi in una supply chain integrata si presuppone che gli attori a monte e a valle nella stessa catena del valore comunichino tra loro e abbiano la facoltà di prendere delle decisioni condivise con lo scopo di migliorare l'efficienza dei loro processi e del mercato di riferimento, con conseguenze positive riguardo la velocità di esecuzione e la scorrevolezza dei flussi di materiali e di informazioni. In questo caso chi si occupa del riciclo

ha un contatto diretto con chi disassembla le batterie ed entrambi gli attori riescono a vedere il mercato di autovetture elettriche a monte, osservando anno per anno quelle che raggiungono il proprio fine vita. Così facendo anche chi deve investire sugli impianti di riciclo basa il *recycling rate* sul valore dello stock *first end of life*, considerando però questa volta anche la percentuale di export e lo *share of directly recycle* per capire quanto investire nell'immediato una volta che viene effettuata la valutazione a riguardo. In questo modo una volta che aumenta il numero di batterie disassemblate grazie al completamento della costruzione dei nuovi impianti di disassemblaggio conseguente agli investimenti nel relativo settore, i nuovi impianti di riciclo sono anch'essi pronti a sostenere immediatamente l'ingente aumento di capacità che deve essere riciclata e non vedono di colpo un aumento della capacità in ingresso senza essere pronti a poterla fronteggiare correttamente. L'equazione in questo caso risulta essere:

$$recycling\,rate = \frac{capacity\,of\,recycling\,factories}{[first\,end\,of\,life \cdot (1 - \%export) \cdot (share\,of\,directly\,recycle)] + time\,of\,investment\,flow} \quad (19)$$

Si va ad osservare il valore dell'attuale capacità di riciclo sul valore della capacità energetica direttamente destinata al riciclo che è presente in *first end of life* al netto delle esportazioni a cui viene aggiunto il valore che ci si aspetta di ottenere in ingresso dalle batterie che terminano in quel determinato anno il proprio secondo fine vita. La funzione delay all'interno di *time of investment flow* (vedi appendice A.1) permette di indicare le batterie in utilizzo stazionario che mediamente in quel determinato momento raggiungono il proprio fine vita, ovvero quelle che sei anni prima del completamento della costruzione delle nuove fabbriche di riciclo erano a sei anni circa dalla fine della loro seconda vita, così come spiegato prima nell'esplicitazione di *time of investment flow*. Questa soluzione permette una grande integrazione della supply chain e una sua completa reattività ai cambiamenti di capacità e di mercato in ognuno dei suoi livelli;

2. nel caso in cui ci si trovi in una supply chain non integrata invece si presuppone che gli attori su diversi livelli della catena del valore non comunichino direttamente per prendere delle decisioni strategiche inerenti agli investimenti e questo potrebbe portare a grandi disallineamenti. In questo caso chi si occupa delle fabbriche di riciclo è come se non vedesse lo stock *first end of life*. Quando quindi le nuove fabbriche di disassemblaggio vengono effettivamente ultimate, il flusso *transporting batteries* aumenta drasticamente di colpo e le fabbriche di riciclo non sono pronte ad avere la capacità sufficiente per far fronte ad un simile aumento di domanda. In questo caso comincerebbero a investire per incrementare il valore della capacità riciclabile e costruire nuovi impianti sempre con un ritardo di circa sei anni, non riuscendo mai a colmare il divario con le fabbriche di disassemblaggio e non riuscendo a porre rimedio al collo di bottiglia creatosi nel corso del tempo. Ecco perché nel modello si tende sempre a preferire la considerazione di scenari in cui la supply chain è integrata, dato che in caso contrario si peccherebbe eccessivamente di inefficienza e in velocità e la catena del valore sarebbe lenta e poco reattiva ai cambiamenti. L'unico modo per fronteggiare questa situazione sarebbe incrementare molto la percentuale di esportazioni per diminuire la quota di batterie destinate

al riciclo, andando ad influire però negativamente sull'autonomia del Paese e rendendolo dipendente dal dover sempre acquistare la quota obbligatoria di materiali critici per creare nuove batterie dall'estero. Si potrebbe anche diminuire lo *share of directly recycle*, ma non è detto che ci sia domanda di batterie per scopri stazionari sufficiente per poter applicare tale soluzione. Nel caso della supply chain non integrata, l'equazione del *recycling rate* diventerebbe:

$$recycling\,rate = \frac{capacity\,of\,recycling\,factories}{[disassembly\,dummy \cdot (1 - share\,export) \cdot (share\,of\,directly\,recycle)] + time\,of\,investment\,flow} \quad (20)$$

L'equazione è analoga a quella della supply chain integrata, ma in questo caso a denominatore si terrebbe conto dello stock di batterie già disassemblate, con maggiore probabilità di incorrere nei problemi sopra esposti.

Successivamente a tali considerazioni, il processo decisionale che porta a decidere quando investire per la creazione di nuovi impianti di riciclo rimane analogo e parallelo a quello destinato agli impianti di disassemblaggio. Viene ipotizzato un *recycling rate target*, che considera il grado di accettabilità che si vuole mantenere del *recycling rate*, ovvero qual è il livello di batterie effettivamente riciclabili annualmente sul totale che si dovrebbe riciclare che può essere accettabile, scelto volta per volta negli scenari di simulazione. Viene calcolato il *recycling rate gap*, che considera la differenza istantanea tra il *recycling rate target* ed il *recycling rate*, il quale nella funzione *investment rate recycling function* (vedi appendice A.3) verrà utilizzato per porre un valore che possa essere indicativo per prendere la decisione di investire. La valutazione sull'effettuazione di nuovi investimenti viene presa in considerazione una volta che gli investimenti precedenti sono portati a compimento e le nuove fabbriche sono state effettivamente realizzate, in modo da essere il più possibile aderenti ad uno scenario reale, in cui è inverosimile che si continui ad investire costantemente. Quando si effettua la valutazione dell'investimento, si considera un valore limite del gap che se è superato porta a dover investire per creare un valore di capacità (che sarà poi convertita in termini di impianti da costruire) che vada effettivamente a colmare il gap attualmente presente.

Nel flusso *investment rate recycling* quindi compariranno gli investimenti in termini di capacità una volta che si decide di effettuarli tramite la funzione adibita ed essi rimangono nel flusso per un anno, ovvero il tempo di delay che viene impiegato per effettuare un investimento. Successivamente, a investimento compiuto, il flusso torna a un valore pari a zero finché non sarà effettuato un nuovo investimento. A questo punto la capacità per cui si è investito viene aggiunta allo stock *factory capacity recycling under construction*, testimone delle fabbriche che sono in costruzione anno per anno e in cui rimane per il tempo medio di costruzione delle aziende, ipotizzato pari a quello per le aziende di disassemblaggio, ovvero cinque anni ed identificato dal flusso in uscita *acquisition rate recycling*(Rosenberg et al. (2023)). Superato l'*acquisition rate*, la nuova capacità massima riciclabile ottenuta tramite gli investimenti entra effettivamente nello stock *capacity of recycling factories*, andando finalmente a influenzare il *capacity model* e incrementando il numero di batterie riciclabili anno per anno, contribuendo a tamponare il collo di bottiglia enorme che si andrebbe a creare anno per anno nel momento in cui si mantenesse la

capacità massima riciclabile invariata nel corso della simulazione senza considerare l'ingente aumento di domanda che ci dovrebbe essere a causa dell'avvento di molti più veicoli elettrici sul mercato ad arrivare al 2050 e alle quote obbligatorie di riciclo imposte dall'UE (Seika, Kubli (2024)). Una volta ottenuto il valore di capacità aggiuntiva riciclabile che deve essere costruito tramite gli investimenti, tramite un modello di ottimizzazione lineare è possibile capire quanti impianti dovrebbero essere costruiti, di quale dimensione e a che costo, come si può osservare nei capitoli successivi.

3.2 Il modello di ottimizzazione lineare per gli investimenti

Tramite il *capacity model* e tramite i due *investment models* si ottengono tra i vari output presenti i due stock *capacity of disassembly factories* e *capacity of recycling factories*. In questi stock, a fine simulazione, si hanno i valori di capacità disassemblabile e riciclabile annualmente grazie agli investimenti che sono stati fatti nel corso degli anni della simulazione. Tali capacità che variano in base agli scenari di simulazione che si vedranno in seguito, espresse in kWh, sono traducibili in impianti da costruire per riuscire ad ottenerle dal 2010 al 2050. Tramite il paper "*A dynamic network design model with capacity expansions for EoL traction battery recycling*" (Rosenberg et al. (2023)), basato su uno studio effettuato in Germania, si può venire a conoscenza delle dimensioni e di alcuni costi variabili e fissi riguardanti la costruzione degli impianti. Si ipotizza che esistano sia per il disassemblaggio che per il riciclaggio tre dimensioni di impianti costruibili, ovvero piccolo, medio e grande. I costi variabili racchiudono diversi costi per i due diversi tipi di impianto. Per gli impianti di disassemblaggio racchiudono le seguenti voci:

- **costo del lavoro**: il disassemblaggio richiede una componente significativa di manodopera, con economie di scala limitate rispetto agli impianti di riciclaggio, perché si basa su operazioni manuali;
- **costi di trasporto**: il trasporto delle batterie dai centri di raccolta agli impianti di disassemblaggio ha un impatto rilevante, con costi influenzati dalla distanza e dal tipo di veicolo utilizzato;
- **costi operativi generali**: comprendono manutenzione degli impianti, gestione degli scarti e altri costi di gestione operativa.

Per gli impianti di riciclaggio invece racchiudono le seguenti voci:

- **costo del lavoro**: minore rispetto al disassemblaggio, grazie all'automazione industriale;
- **costo energetico**: impatto rilevante nei processi di idrometallurgia e pirometallurgia;

- **costo dei materiali e smaltimento rifiuti**: inclusi i reagenti chimici e il trattamento degli scarti industriali.

I costi variabili sono quindi considerati per andare ad ipotizzare quali possono essere i costi di esercizio aggiuntivi con l'aumento delle batterie disassemblabili o riciclabili, mentre quelli che in (Rosenberg et al. (2023)) vengono chiamati costi fissi non vengono considerati in questa analisi in quanto sono su base annuale e non sono inseribili nel modello di ottimizzazione in quanto è la simulazione che scandisce i tempi di investimento e non è possibile creare un modello generale che possa sapere in anticipo esattamente quando vengono costruiti gli impianti. Tali costi servirebbero per andare a osservare i costi degli investimenti per la creazione di nuovi impianti, che si andranno invece a calcolare sulla base delle tonnellate di capacità trattabili dagli impianti, ottenendo il valore da una fonte differente. Sono stati nella presente tesi infatti tratti da uno studio del Politecnico di Milano (Motus-E (2023)) e sono pari a $770\frac{euro}{t}$, con le tonnellate intese come tonnellate di capacità, e quindi di batterie, che possono essere trattate dagli impianti annualmente in base alla loro dimensione. Questo valore sarà considerato essere il medesimo per tutti gli impianti considerati nel modello di investimenti.

Il modello di ottimizzazione per il disassemblaggio Il modello di ottimizzazione lineare dedicato al disassemblaggio è stato creato per andare a calcolare il numero di impianti da costruire con lo scopo di raggiungere effettivamente al 2050 la quantità di capacità disassemblabile di batterie agli ioni di litio così come indicato nello stock *capacity of disassembly factories*. Il modello è stato compilato ed eseguito su Microsoft Excel tramite lo strumento "risolutore".

Gli **input** da dare in pasto al modello che si hanno a disposizione sono:

- La capacità media degli impianti che possono disassemblare le batterie in base alla propria dimensione: $k_i \quad \forall i = 1, ..., n$, con n numero delle tipologie di impianti costruibili in base alle loro dimensioni (nel caso dell'analisi si ha $n = 3$). I dati vengono forniti da Rosenberg et al. (2023) in batterie all'anno e sono i seguenti, espressi nella tabella 8.

Tabella 8: Capacità media annuale degli impianti di disassemblaggio $[\frac{battery}{year}]$

Impianto	**Capacità** $[\frac{battery}{year}]$
Piccolo	6,250
Medio	12,500
Grande	25,000

I dati che servono al modello però devono essere in $\frac{kWh}{year}$ per essere coerenti con i dati di input provenienti dal modello degli investimenti, con i quali andranno a relazionarsi nelle equazioni del modello. Durante la simulazione

del *capacity model* è possibile ottenere il valore dell'*average battery capacity* $[\frac{kWh}{battery}]$, che si ottiene facendo la media tra valore a inizio simulazione e valore a fine simulazione delle capacità medie aggregate che hanno le batterie nel corso degli anni(calcolate tramite una media pesata sulla quantità di LFP e NMC in circolazione, come visto nel capacity model) e che può variare da simulazione a simulazione sulla base dei valori di *percentage of lfp*. Moltiplicando tale fattore di conversione (in $[\frac{kWh}{battery}]$) con i dati di Rosenberg et al. (2023) in $(\frac{battery}{year})$ si ottiene il giusto valore di capacità k_i che serve in input al modello in $[\frac{kWh}{year}]$ per ognuna delle dimensioni considerate;

- I costi di investimento a impianto per ogni dimensione di impianto: $f_i \quad \forall i = 1, ..., n$. Conoscendo il costo di investimento in $[\frac{euro}{t}]$ (Motus-E (2023)), è possibile ricavare il costo di investimento in $[\frac{euro}{kWh}]$, utilizzando un altro dato restituito dalla simulazione, ovvero l'*average battery density* $(\frac{kWh}{t})$. Tale dato è calcolato facendo una media delle capacità delle batterie presenti sul mercato ponderata sulla *percentage of lfp*, dato che le batterie LFP ed NMC hanno densità diverse, come osservabile nel capitolo 3.1. Moltiplicando la densità media per i costi di investimento in $[\frac{euro}{t}]$ si possono ottenere i costi di investimento in $[\frac{euro}{kWh}]$, infatti $\frac{[\frac{euro}{t}]}{[\frac{kWh}{t}]} = [\frac{euro}{kWh}]$ e poi moltiplicando il valore in $[\frac{euro}{kWh}]$ per la capacità disassemblabile da un impianto si possono ottenere i costi di investimento f_i in $[\frac{euro}{impianto}]$;

- I costi variabili $c_i \quad \forall i = 1, ..., n$ sono forniti da Rosenberg et al. (2023) per gli impianti di disassemblaggio e sono espressi in tabella 9.

Tabella 9: Costi variabili degli impianti di disassemblaggio $[\frac{euro}{battery}]$

Impianto	**Costi variabili** $[\frac{euro}{battery}]$
Piccolo	65
Medio	60
Grande	57

Anch'essi vanno convertiti in $[\frac{euro}{kWh}]$ dividendoli per l'*average battery capacity* $[\frac{kWh}{battery}]$. In questo caso si parla di kWh effettivamente disassemblabili in termini di batterie in modo cumulato sino al 2050 dato che si stanno considerando costi di esercizio dipendenti dalle quantità. Nei costi di investimento, invece, vado a considerare i kWh annuali disassemblabili in base alla dimensione dell'impianto per calcolare i costi in base alla dimensione.

- La domanda totale da soddisfare (D) come incremento di capacità al 2050 rispetto al valore del 2010 è l'input derivante dai modelli degli investimenti, infatti:

$$D = capacity\,of\,disassembly\,factories\,[kWh] + capacity\,under\,construction[kWh] - initial\,capacity\,value[kWh] \quad (21)$$

Le **variabili decisionali** del modello sono invece:

- $x_i \quad \forall i = 1, ..., n$, che rappresentano la somma degli impianti costruiti e degli impianti in costruzione della dimensione i dal 2010 al 2050;
- $u_i \quad \forall i = 1, ..., n$, che rappresentano la capacità effettivamente utilizzata (o potenzialmente utilizzabile nel caso di impianti in costruzione) sul totale di quella disponibile dopo gli investimenti riguardo gli impianti di tipo i.

La **formulazione del modello** è la seguente:

Funzione obiettivo (min costi totali):

$$\min \sum_{i=1}^{n} (f_i \cdot x_i + c_i \cdot u_i) \tag{22}$$

Vincoli:

- **Soddisfazione della domanda:**

$$\sum_{i=1}^{n} u_i \geq D \tag{23}$$

- **Capacità massima per impianto da rispettare:**

$$u_i \leq x_i \cdot k_i, \quad \forall i = 1, ..., n \tag{24}$$

- **Quota massima di domanda soddisfatta da un singolo impianto (diversificazione forzata):**

$$u_i \leq \alpha \cdot D, \quad \forall i = 1, ..., n \tag{25}$$

- **Interezza e non negatività:**

$$x_i \in \mathbb{Z}^+, \quad u_i \geq 0, \quad \forall i = 1, ..., n \tag{26}$$

Spiegazione: La funzione obiettivo (22) impone la minimizzazione dei costi totali di investimento e di esercizio. È possibile andarla a modificare togliendo i costi di esercizio e andando a minimizzare solo quelli di investimento. Il vincolo 23 va ad imporre che la domanda di capacità aggiuntiva sia interamente soddisfatta; il vincolo 24 va ad imporre che la capacità effettivamente aggiunta sino al 2050 non vada a superare la capacità massima degli impianti effettivamente costruiti; Il vincolo 25 è introdotto per favorire una maggiore *diversificazione* nella scelta delle dimensioni degli impianti costruiti, attraverso un parametro α tale che $0 \leq \alpha \leq 1$. Impostando α in un intervallo compreso tra 0 e 1, si controlla il livello massimo di capacità che un singolo tipo di impianto può contribuire a soddisfare rispetto alla domanda totale di riciclo. Ad esempio, con $\alpha = 0.5$, nessun tipo di impianto potrà coprire da solo più del 50% della capacità richiesta, obbligando il modello a distribuire

gli investimenti tra più soluzioni impiantistiche. Questo permette di bilanciare le economie di scala con una maggiore modularità del sistema, riducendo il rischio di colli di bottiglia o dipendenze eccessive da un'unica infrastruttura. Nel modello implementato, il valore di α può essere regolato in base a strategie di pianificazione industriale: un valore più alto favorisce la costruzione di impianti di grande scala (ottimizzando i costi unitari), mentre un valore più basso promuove una rete più distribuita di impianti di varia dimensione, aumentando la flessibilità del sistema. La scelta finale dipende quindi dagli obiettivi strategici del piano di investimento e dalla distribuzione geografica degli impianti di riciclo. Questo vincolo impedisce quindi che l'intera capacità installata sia concentrata su un'unica tipologia di impianto, costringendo il modello a distribuire la produzione su più categorie. Se il vincolo non fosse presente, il modello potrebbe scegliere liberamente di costruire solo impianti di un determinato tipo, qualora questa soluzione risultasse più conveniente. In teoria, se il risolutore individuasse tale soluzione, questa dovrebbe essere quella ottima. Tuttavia, la presenza di variabili intere nel modello introduce complessità computazionale, rendendo possibile che l'ottimo individuato dal risolutore non sia globale ma locale. Infatti, il risolutore, dopo un certo tempo limite, restituisce la miglior soluzione trovata fino a quel momento, senza garanzia di aver esplorato l'intero spazio delle soluzioni. L'uso di variabili intere può quindi aumentare la difficoltà del problema, limitando la capacità del risolutore di trovare la soluzione realmente ottima. Il vincolo di diversificazione, se attivato (mentre può essere reso ininfluente ponendo $\alpha = 1$), induce il risolutore a considerare soluzioni alternative che altrimenti potrebbero essere trascurate, ampliando l'orizzonte di ricerca dell'ottimizzazione. Empiricamente, è stato osservato che, in alcuni casi, l'inclusione di questo vincolo porta a soluzioni con costi inferiori rispetto a quelle ottenute senza di esso, suggerendo che l'esplorazione di configurazioni più diversificate possa migliorare il risultato finale. Il vincolo 26 invece impone semplicemente le condizioni di interezza e non negatività delle variabili in gioco.

Il modello di ottimizzazione per il riciclaggio Il modello di ottimizzazione lineare destinato al riciclaggio è esattamente identico a quello per il disassemblaggio in termini di funzione obiettivo, variabili e vincoli. Le uniche differenze possono essere riscontrate in termini di input:

- I valori di capacità media riciclabile annualmente degli impianti di ogni dimensione sono forniti in questo caso da Rosenberg et al. (2023) in $[\frac{t}{year}]$ ed espressi in tabella 10.

Tabella 10: Capacità media annuale degli impianti di riciclaggio $[\frac{t}{year}]$

Impianto	**Capacità** $[\frac{t}{year}]$
Piccolo	2,500
Medio	5,000
Grande	10,000

Anche qui è necessario quindi un fattore di conversione che permetta di trasformarli in $[\frac{kWh}{year}]$ in modo da uniformare le unità di misura del modello di ottimizzazione con quelle degli input provenienti dai modelli degli investimenti. In questo caso basta il valore di *average capacity density* ($[\frac{kWh}{t}]$ calcolato come spiegato sopra nel modello di ottimizzazione per il disassemblaggio. È sufficiente quindi moltiplicare i valori in input forniti da Rosenberg et al. (2023) per la densità per ottenere la capacità $k_i \quad \forall i = 1, ..., n$ in $[\frac{kWh}{year}]$.

- I costi di investimento $f_i \quad \forall i = 1, ..., n$ sono calcolati esattamente come spiegato per il disassemblaggio tenendo conto sempre del valore di $770\frac{euro}{t}$ (Motus-E (2023)) diviso per la densità per trovare il costo al kWh, il quale viene successivamente moltiplicato per la capacità in kWh delle varie tipologie di impianto per ottenere il costo ad impianto;

- I costi variabili $c_i \quad \forall i = 1, ..., n$, esplicitati in tabella 11, sono forniti da Rosenberg et al. (2023) sempre in $[\frac{euro}{t}]$, ma stavolta le tonnellate sono quelle effettivamente riciclate fino al 2050 dato che considero i costi di esercizio e non le tonnellate annuali riciclabili dagli impianti che definiscono la capacità che impone la dimensione dell'impianto determinante i costi di investimento.

Tabella 11: Costi variabili degli impianti di riciclaggio $[\frac{euro}{t}]$

Impianto	**Costi variabili** $[\frac{euro}{t}]$
Piccolo	1,400
Medio	1,350
Grande	1,300

Anche qui posso trovare i costi al kWh dividendo i valori per la *average battery density* proveniente dal modello di simulazione in base allo scenario considerato per andare a ottenere i valori coerenti per il modello in questione;

- la domanda (D), infine, è la domanda di capacità aggiuntiva da creare in termini di impianti di riciclo fino al 2050 per far fronte all'aumento dei veicoli elettrici ingente e continuativo, data dagli stock presenti nel modello di investimento per il riciclaggio:

$$D = capacity\,of\,recycling\,factories\,[kWh] + capacityunderconstruction\,[kWh] - initial\,capacity\,value\,[kWh] \tag{27}$$

La funzione obiettivo, i vincoli e le variabili del modello sono invece esattamente analoghi a quelli del modello di ottimizzazione lineare per le fabbriche di disassemblaggio.

I risultati di entrambi i modelli nei vari scenari considerati vengono analizzati nei capitoli inerenti i risultati e le discussioni e sono gli output principali per cui è stato ideato il modello di simulazione e l'analisi di cui si occupa questa tesi, che pone a confronto i costi che probabilisticamente dovranno essere sostenuti nei prossimi anni dall'Italia in diversi scenari economici, di mercato e politici per far

fronte all'ingente aumento di autovetture elettriche e quindi di batterie agli ioni di litio, portando alla necessità di doverle trattare durante il loro fine vita per ottimizzare le risorse del Paese e dipendere il meno possibile da Paesi esteri, provando a giovare il più possibile della situazione di mercato emergente.

4 Risultati della simulazione

L'obiettivo di questo capitolo è presentare e analizzare i risultati ottenuti dalla simulazione del ciclo di vita delle batterie agli ioni di litio nel mercato italiano. Attraverso il modello System Dynamics ed il modello di ottimizzazione lineare implementati, sono stati valutati diversi scenari per comprendere l'impatto delle politiche di adozione dei veicoli elettrici, della gestione delle batterie a fine vita e degli investimenti necessari per il potenziamento della capacità di disassemblaggio e riciclo. Data la complessità del sistema studiato e la molteplicità dei fattori che ne influenzano l'evoluzione, è stato necessario individuare un insieme ristretto ma significativo di parametri chiave, sui quali costruire diversi scenari di simulazione. L'obiettivo è quello di isolare gli effetti principali delle diverse strategie di gestione dell'end-of-life delle batterie e comprendere le dinamiche che possono portare a colli di bottiglia o a inefficienze nella filiera del riciclo e a generare un certo numero di investimenti di una certa entità. La scelta dei parametri è stata guidata dalla loro influenza diretta sui flussi di batterie a fine vita, sulla capacità di trattamento degli impianti e sulle necessità di investimento, garantendo al contempo una chiara interpretabilità dei risultati.

Dopo un'analisi preliminare, i parametri selezionati per la simulazione degli scenari sono stati i seguenti:

1. **il tasso di adozione dei veicoli elettrici**: questo parametro rappresenta una delle variabili più critiche del modello, poiché determina il numero totale di batterie che entreranno nel mercato e, successivamente, giungeranno a fine vita. Si è deciso di considerare tre diversi scenari di crescita della mobilità elettrica:

   - **scenario Business As Usual (BAU)**: crescita graduale e senza interventi normativi stringenti;
   - **scenario ICE BAN**: eliminazione progressiva dei veicoli a combustione interna entro il 2035, che accelera la transizione verso l'elettrico;
   - **scenario NET ZERO**: massima adozione di veicoli elettrici per raggiungere le emissioni nette pari a zero entro il 2050.

   L'analisi di questi scenari è fondamentale per valutare l'impatto delle politiche pubbliche sulle infrastrutture di riciclo, poiché un'accelerazione della transizione energetica comporterà un aumento più rapido e intenso del numero di batterie giunte a fine vita, con conseguenti sfide logistiche e industriali.

2. **la quota di batterie esportate**: la percentuale di batterie a fine vita esportate all'estero per il trattamento rappresenta un aspetto cruciale nella definizione della capacità impiantistica necessaria in Italia. Attualmente, una parte delle batterie esauste viene inviata a impianti di riciclo situati in altri paesi, ma il futuro di questa pratica dipenderà da diversi fattori, tra cui le regolamentazioni europee sulla gestione dei rifiuti pericolosi e la necessità di assicurare

l'autosufficienza nella filiera del recupero di materiali critici. Si sono quindi simulati diversi livelli di esportazione:

- **0% di export**: tutte le batterie devono essere trattate internamente, massimizzando la necessità di nuovi impianti;
- **40% di export**: scenario intermedio, in cui una parte delle batterie viene lavorata all'estero, riducendo la domanda di capacità di riciclo nazionale;
- **80% di export**: gran parte delle batterie viene esportata, minimizzando gli investimenti in nuove infrastrutture interne, ma aumentando la dipendenza da impianti esteri.

Questo parametro è stato scelto perché incide direttamente sugli investimenti necessari nel sistema nazionale di gestione dell'end-of-life delle batterie. Una maggiore esportazione riduce la necessità di nuovi impianti, ma potrebbe rendere il Paese vulnerabile a restrizioni normative future o alla volatilità dei costi di trattamento all'estero.

3. **la distribuzione tra riciclo diretto e repurposing**: dopo il primo ciclo di utilizzo in veicoli elettrici, le batterie possono essere destinate al riciclo immediato o essere riutilizzate in applicazioni stazionarie (ad esempio, per lo stoccaggio di energia rinnovabile). La scelta tra queste due opzioni ha impatti diretti sulla tempistica con cui le batterie entrano nel processo di riciclo, e quindi sulla necessità di capacità impiantistica nel breve e nel lungo periodo. Sono stati quindi simulati tre scenari:

   - **50% riciclo diretto - 50% seconda vita**: scenario bilanciato tra riciclo e riutilizzo;
   - **80% riciclo diretto - 20% seconda vita**: scenario in cui la priorità è il recupero immediato dei materiali critici per la produzione di nuove batterie;
   - **20% riciclo diretto - 80% seconda vita**: scenario in cui si massimizza il riutilizzo delle batterie prima del loro definitivo smaltimento.

   Questo parametro è stato selezionato perché il riutilizzo delle batterie può influire significativamente sulla gestione del flusso di materiali. Se molte batterie vengono destinate a una seconda vita, il picco di domanda per il riciclo potrebbe spostarsi più avanti nel tempo, mentre un riciclo immediato implicherebbe una necessità più rapida di espansione della capacità impiantistica.

4. **il valore critico del gap tra rate target e rate effettivo**: questo parametro rappresenta la soglia oltre la quale viene attivato un nuovo investimento per incrementare la capacità di disassemblaggio o riciclo. In altre parole, definisce il margine di tolleranza tra la capacità attuale del sistema e il livello di domanda prima che si renda necessario costruire nuovi impianti. La scelta del valore critico di questo gap è fondamentale per comprendere come il sistema reagisce alle variazioni nella domanda di trattamento delle batterie e per identificare i momenti in cui l'incremento di capacità diventa indispensabile

per evitare colli di bottiglia. Per il riciclaggio, sono stati testati diversi valori del gap, come:

- **gap = 0.2**: il sistema reagisce rapidamente e investe in nuove capacità appena il divario tra domanda e capacità supera una soglia minima;
- **gap = 0.35**: vengono tollerati livelli moderati di stress sulla capacità prima di attivare nuovi investimenti;
- **gap = 0.5**: il sistema posticipa gli investimenti fino a quando il divario tra domanda e capacità raggiunge livelli critici, aumentando il rischio di saturazione degli impianti esistenti.

Per il disassemblaggio invece si ipotizza di avere sempre un gap di 0.2, in quanto nel momento in cui si va a definire uno degli scenari tra BAU, NET ZERO e ICE BAN le batterie da disassemblare rimangono le stesse indipendentemente dalla variazione della % di export e dalla variazione della % di riciclo diretto. Si tiene quindi in considerazione che la risposta al cambiamento della domanda di disassemblaggio debba essere sempre parecchio reattiva, in quanto se non vengono disassemblate le batterie si ha un ingente porzione di spazio sempre occupata e non si può neanche procedere con l'esportazione secondo le ipotesi considerate, contribuendo a creare il collo di bottiglia più svantaggioso dell'intero sistema. Questo parametro è stato scelto perché influisce direttamente sulle tempistiche di investimento e sulla gestione dei colli di bottiglia. Se il valore del gap è troppo alto, il sistema potrebbe trovarsi in difficoltà a gestire l'afflusso di batterie da trattare, mentre un valore troppo basso potrebbe portare a investimenti eccessivi o prematuri.

I risultati ottenuti dalle simulazioni verranno presentati attraverso grafici e tabelle comparative, con l'obiettivo di identificare le implicazioni di ciascun scenario in termini di:

- quantità di batterie in strada e a fine vita, esportate e non esportate, riciclate e riutilizzate;
- capacità impiantistica richiesta per il disassemblaggio e il riciclo;
- investimenti necessari per sostenere il sistema di riciclo fino al 2050.

L'analisi di questi dati fornirà le basi per il successivo capitolo di discussione, in cui verranno confrontati tra loro i diversi scenari per identificare le strategie più efficaci per la gestione dell'end-of-life delle batterie agli ioni di litio in Italia.

Impostazione degli scenari di simulazione Simulare ed osservare i risultati di tutte le combinazioni possibili di questi parametri tra loro risulterebbe eccessivamente oneroso e porterebbe anche ad una probabile perdita di efficacia scientifica

ed espositiva, in quanto sarebbe alto il rischio di disperdere i risultati e non riuscire a cogliere i punti cruciali della simulazione. Sono state quindi scelte alcune combinazioni di parametri da testare che, grazie alle motivazioni esposte in seguito, sembrano essere le più significative o le più realizzabili. Si è cercato di mantenere comunque un equilibrio cercando di andare ad analizzare lo stesso numero di volte la presenza di ognuno dei punti dei parametri sopra indicati, in modo da garantire che comunque ognuno di essi potesse esprimere il proprio spessore empirico e si riuscisse a coprire uno spettro di possibili contesti o scenari futuri che fosse il più ampio possibile. Per ogni scenario viene esplicitato il motivo della scelta, vengono mostrati i grafici mostranti l'andamento dei principali stock nel corso degli anni e vengono riportati i costi di investimento ottenuti tramite il modello di ottimizzazione lineare. Di seguito viene mostrata una tabella preliminare (tabella 12) indicante i diversi scenari ipotizzati per l'analisi e una motivazione sintetica inerente al motivo della scelta. Successivamente ognuno degli scenari viene approfondito in un paragrafo ad esso dedicato per riportare effettivamente i risultati a cui porta.

Scenario	Adozione EV	Export	Riciclo / Seconda Vita	Gap Investimenti	Motivazione
Scenari BAU					
1	BAU	40%	50% / 50%	Medio	Scenario di riferimento, crescita moderata senza interventi drastici.
2	BAU	80%	20% / 80%	Alto	Alta esportazione e massimo riutilizzo, possibile scarsità di materiali critici.
3	BAU	0%	80% / 20%	Basso	Autosufficienza nel riciclo, con elevati investimenti infrastrutturali.
Scenari ICE BAN					
4	ICE BAN	40%	50% / 50%	Medio	Transizione accelerata con un equilibrio tra riutilizzo e riciclo.
5	ICE BAN	80%	20% / 80%	Alto	Alta esportazione con priorità al riutilizzo, riducendo il fabbisogno di riciclo immediato.
6	ICE BAN	0%	80% / 20%	Basso	Massimo riciclo e autonomia nel trattamento delle batterie, impatto significativo sugli investimenti.
Scenari NET ZERO					
7	NET ZERO	40%	50% / 50%	Medio	Scenario sostenibile con transizione decisa e mix equilibrato di riciclo e seconda vita.
8	NET ZERO	80%	20% / 80%	Alto	Ritardi negli investimenti e alta esportazione, possibili colli di bottiglia.
9	NET ZERO	0%	80% / 20%	Basso	Autosufficienza totale con investimenti rapidi per massimizzare la capacità di riciclo.

Tabella 12: Scenari selezionati per la simulazione

Digressione sul parametro α dell'ottimizzazione lineare Si può notare che tra i parametri che vengono fatti variare non è presente il parametro α dell'ottimizzazione lineare e tale scelta è stata fatta appositamente. Nel modello di ottimizzazione lineare, il parametro α definisce la quota massima della domanda di disassemblaggio o di riciclo che può essere soddisfatta da un singolo tipo di impianto. L'impostazione di questo valore è fondamentale per garantire una distribuzione equilibrata della capacità impiantistica, evitando che il modello favorisca in maniera esclusiva una singola tipologia di infrastruttura, con possibili implicazioni negative a livello territoriale e operativo e si è scelto di fissare α a valori distinti per le due fasi del processo: $\alpha = 0.7$ per il disassemblaggio e $\alpha = 0.5$ per il riciclo. Questa distinzione è stata adottata per riflettere le diverse esigenze operative e strategiche di ciascuna fase e la quantità di capacità richiesta. Per quanto riguarda il disassemblaggio, il numero di veicoli elettrici a fine vita è destinato a crescere costantemente nel tempo e la capacità richiesta aggiuntiva per disassemblare le batterie è sempre più alta di quella richiesta dal riciclaggio. In questo contesto, il modello deve poter sfruttare al massimo le economie di scala, poiché la costruzione di impianti di grande dimensione consente di abbattere i costi unitari e migliorare l'efficienza del processo. Per questo motivo, si è scelto di impostare $\alpha = 0.7$, lasciando una maggiore libertà al modello nella selezione delle configurazioni ottimali, senza imporre eccessivi vincoli di diversificazione. Questo valore garantisce che nessun tipo di impianto monopolizzi completamente la domanda, ma al contempo consente al modello di privilegiare configurazioni più efficienti dal punto di vista economico. Per quanto riguarda il riciclo, invece, la distribuzione geografica degli impianti assume un ruolo ancora più rilevante, la capacità richiesta aggiuntiva risulta sempre essere inferiore rispetto al disassemlaggio ed il trasporto delle batterie esauste verso i centri di trattamento rappresenta un fattore critico sia in termini di costi che di impatto ambientale. Per questi motivi, è stato scelto di fissare $\alpha = 0.5$, imponendo una maggiore diversificazione della capacità impiantistica rispetto al disassemblaggio, in quanto la capacità minore richiesta può permettere di progettare incentivando una rete di impianti più distribuita sul territorio. Tale configurazione porta benefici sia in termini di resilienza del sistema, riducendo il rischio di colli di bottiglia in caso di picchi di domanda, sia in termini di accessibilità e logistica, riducendo i costi di trasporto e le emissioni associate alla movimentazione delle batterie esauste. Questa differenziazione tra il parametro α per il disassemblaggio e per il riciclo, quindi, consente al modello di ottimizzare la capacità impiantistica rispettando le specificità di ciascun processo. Nel primo caso, la priorità è garantire una capacità adeguata per gestire il crescente numero di veicoli elettrici a fine vita e sfruttare economie di scala (avendo valori di capacità richiesta estremamente elevati), mentre nel secondo caso l'obiettivo è costruire una rete impiantistica più bilanciata ed efficiente, con una distribuzione più capillare sul territorio. Inoltre, questa scelta si allinea con quanto discusso in precedenza nella tesi riguardo l'esplorazione di soluzioni diverse per mitigare la rigidità dovuta alla presenza di variabili intere. Imporre un vincolo di diversificazione sugli impianti consente di rendere il modello più flessibile, evitando che la selezione discreta di poche tipologie di impianti porti a soluzioni eccessivamente polarizzate e potenzialmente irrealistiche. L'idea è quindi quella di consentire al modello di ottimizzare la capacità impiantistica senza eccessive rigidità, ma evitando al contempo

una concentrazione estrema della capacità in pochi poli, garantendo così una rete impiantistica più resiliente e adattabile alle esigenze territoriali.

Scelta del disassembly rate target e del recycling rate target Il *disassembly target* ed il *recycling target* delle batterie agli ioni di litio sono stati impostati con una crescita progressiva, partendo da un valore di 0.6 fino al 2035, per poi aumentare a 0.8 dal 2035 in avanti. Questa scelta è stata adottata per riflettere l'evoluzione attesa del settore e si basa su tre principali motivazioni:

1. **miglioramenti tecnologici e aumento dell'efficienza operativa**: nei primi anni della transizione verso la mobilità elettrica, i processi di disassemblaggio e riciclo presentano ancora limitazioni tecnologiche e operative che impediscono di raggiungere elevati livelli di efficienza. Il recupero delle batterie esauste richiede ancora interventi manuali e infrastrutture specializzate che non sono ancora diffuse su larga scala. Nonostante ciò, si deve tenere in considerazione che nel corso dei prossimi anni è molto probabile un efficientamento dei processi e un miglioramento tecnologico, grazie all'importanza data a questo settore e agli investimenti che su di esso verranno effettuati. Per questo motivo, si ipotizza che a partire dal 2035, con l'adozione su larga scala di tecnologie più avanzate e automatizzate, l'efficienza del disassemblaggio e del riciclo aumenterà, giustificando un target superiore.

2. **adeguamento delle normative e sviluppo della filiera industriale**: l'Unione Europea ha già introdotto nuove normative per regolamentare il fine vita delle batterie, tra cui il Regolamento (UE) 2023/1542 (European Parliament and Council of the European Union (2023)), che prevede quote minime di materiali riciclati nelle nuove batterie e obiettivi progressivi per la gestione sostenibile del riciclo. Sebbene al momento la filiera del riciclo non sia ancora pienamente sviluppata, è ragionevole supporre che nei prossimi anni verranno implementate infrastrutture sempre più efficienti per il trattamento delle batterie esauste. Il passaggio a un target di 0.8 dal 2035 tiene conto dell'impatto che tali normative avranno nel medio termine, portando a un sistema più strutturato e in grado di gestire volumi crescenti di batterie a fine vita.

3. **riduzione dei costi e consolidamento del settore**: nei primi anni della transizione, il riciclo e il disassemblaggio delle batterie comportano costi elevati a causa della limitata diffusione di impianti specializzati e della complessità dei processi di recupero. Tuttavia, con l'aumento della domanda di riciclo e il consolidamento della filiera industriale, si prevede che il costo unitario delle operazioni diminuirà grazie alle economie di scala. Le aziende del settore avranno quindi maggiore convenienza economica a trattare un numero crescente di batterie e a costruire grandi impianti, aumentando il tasso effettivo di recupero. L'aumento del target dal 2035 riflette anche questo passaggio verso un sistema più maturo, in cui i costi ed i processi ottimizzati permetteranno di raggiungere livelli di efficienza più elevati rispetto a quelli iniziali.

Questa impostazione del modello consente di rappresentare in modo più realistico l'evoluzione del settore del riciclo e del disassemblaggio delle batterie, evitando di ipotizzare fin da subito tassi di recupero troppo elevati in una fase in cui la tecnologia e le infrastrutture non sono ancora completamente sviluppate. L'aumento progressivo del target consente inoltre di cogliere la transizione da un sistema in fase di crescita a un'industria più consolidata, in grado di operare in modo più efficiente e sostenibile.

I grafici Nelle sezioni successive, durante l'esposizione dei risultati, vengono mostrati alcuni grafici identificativi dei risultati, che tengono conto dei principali output che si possono osservare dalla simulazione. Essendo gli stessi grafici che sono poi necessari nella parte di discussione per fare dei confronti tra i vari scenari, è opportuno spiegare anticipatamente a cosa fanno riferimento e come devono essere interpretati:

- **batterie in strada e batterie che raggiungono la first-end-of-life**: questo grafico mostra il confronto tra la capacità energetica presente in strada anno per anno con la cumulata delle batterie che raggiungono la fine della propria prima vita. Rappresenta quindi il numero totale di batterie che hanno raggiunto la first-end-of-life dal 2010 al 2050 messo a confronto con l'andamento della presenza di veicoli elettrici sulle strade italiane (non la cumulata ma il valore effettivo presente ogni anno). L'obiettivo dei grafici è far capire quante batterie a fine vita vengono prodotte cumulativamente nell'arco di 40 anni rispetto a quelle che sono presenti sulle strade ogni anno; tali grafici sono diversi tra scenari BAU, NET ZERO e ICE BAN, ma sono invece i medesimi all'interno del medesimo scenario, anche se gli altri parametri vengono fatti variare. Infatti né la % di export, nè la % di riciclo diretto né il gap di capacità vanno a influire su questi valori.
- **batterie disassemblate**: grafico che mostra le batterie che sono effettivamente state disassemblate cumulativamente dal 2010 al 2050. Può essere confrontato con la cumulata delle batterie che raggiungono la fine della loro prima vita, presente nel grafico soprastante, per osservare quante batterie riesco a disassemblare rispetto al totale di quelle a fine prima vita considerando la capacità massima disassemblabile che aumenta nel tempo grazie agli investimenti; anche questi grafici, come quelli sopra, sono diversi tra scenari BAU, NET ZERO e ICE BAN, ma sono invece i medesimi all'interno del medesimo scenario, anche se gli altri parametri vengono fatti variare. Infatti né la % di export, nè la % di riciclo diretto né il gap di capacità vanno a influire su questi valori.
- **fabbriche di disassemblaggio costruite e fabbriche di disassemblaggio in costruzione**: mostra la capacità di disassemblaggio che in 40 anni è stata aggiunta, facendo vedere la relazione tra quella in costruzione e quella effettivamente resa operativa durante i 40 anni di simulazione. Anche questi grafici, come quelli sopra, sono diversi tra scenari BAU, NET ZERO e ICE BAN, ma sono invece i medesimi all'interno del medesimo scenario, anche se

gli altri parametri vengono fatti variare. Infatti né la % di export, nè la % di riciclo diretto né il gap di capacità vanno a influire su questi valori (infatti il gap per il disassemblaggio è considerato sempre uguale).

- **batterie riciclate e batterie in seconda vita**: grafico che mostra un confronto tra la cumulata delle batterie effettivamente riciclate, rappresentate dalla capacità riciclata, e la quantità di batterie (e quindi di energia) utilizzata per scopi stazionari puntualmente;
- **batterie esportate e batterie in Italia**: mostra la cumulata nel tempo, dal 2010 al 2050, delle batterie che vengono esportate rispetto a quelle che vengono trattenute in Italia alla fine della loro prima vita;
- **fabbriche di riciclaggio costruite e fabbriche di riciclaggio in costruzione**: mostra la capacità di riciclaggio che in 40 anni è stata aggiunta, facendo vedere la relazione tra quella in costruzione e quella effettivamente resa operativa durante i 40 anni di simulazione.

4.1 Scenari Business As Usual (BAU)

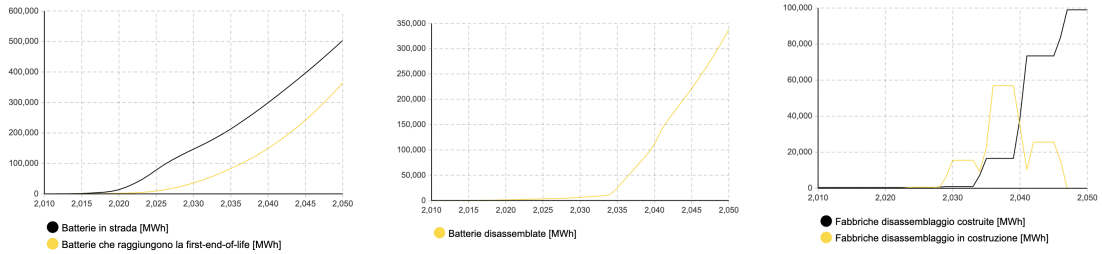
Lo scenario Business As Usual (BAU) rappresenta l'evoluzione del sistema di gestione delle batterie a fine vita in assenza di significativi cambiamenti normativi o tecnologici rispetto alle tendenze attuali. In questo scenario, il mercato e le infrastrutture di riciclo si sviluppano in modo graduale e organico, senza interventi drastici da parte di policy maker o investimenti straordinari nel settore. Nel contesto delle batterie agli ioni di litio provenienti dai veicoli elettrici, uno scenario BAU assume, generalmente, che:

- la crescita della mobilità elettrica prosegua secondo i trend attuali, senza accelerazioni imposte da normative più stringenti (come un divieto anticipato delle auto a combustione interna);
- l'infrastruttura di riciclo si espanda in modo proporzionato alla domanda, ma senza incentivi diretti o obblighi specifici per il recupero e il riutilizzo delle batterie;
- le pratiche industriali e di mercato rimangano simili a quelle attuali, con una combinazione di riciclo, riutilizzo e esportazione delle batterie a fine vita in base a fattori economici e logistici.

Secondo Seika, Kubli (2024), lo sviluppo della filiera delle batterie a fine vita segue attualmente una traiettoria in cui la capacità di riciclo fatica a stare al passo con l'aumento delle batterie esauste. Nel caso in cui non vengano introdotte normative più stringenti, il settore tenderà a favorire le soluzioni più economicamente vantaggiose. In assenza di forti incentivi o obblighi normativi, si ipotizza che il mercato tenda più probabilmente a posticipare gli investimenti in nuove infrastrutture,

portando a possibili colli di bottiglia nel trattamento delle batterie a fine vita. Di seguito, in figura 6, sono riportati i risultati generali dello scenario BAU.

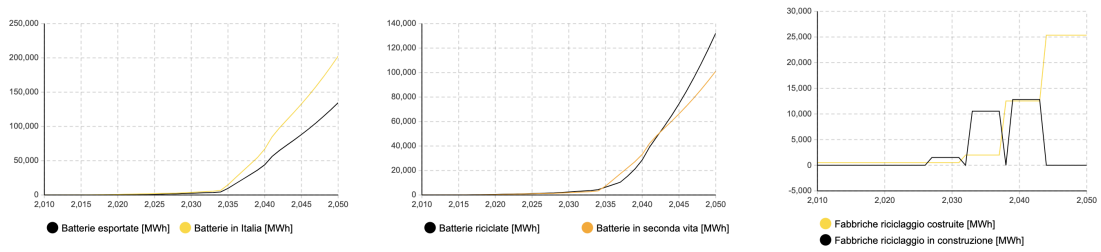
Figura 6: Risultati generali Business As Usual



4.1.1 BAU 1: 40% export; riciclo 50% - riutilizzo 50%; gap medio

Questo scenario rappresenta l'evoluzione più probabile del sistema di gestione delle batterie a fine vita nel caso in cui il mercato continui a svilupparsi senza interventi normativi significativi. Si assume che l'Italia mantenga un approccio misto, con una parte delle batterie esauste esportata per il trattamento in impianti esteri e una parte gestita internamente attraverso il riciclo locale. La scelta di questo scenario è motivata dal fatto che riflette la tendenza attuale del settore, dove l'export delle batterie a fine vita è ancora una pratica diffusa, a causa della capacità di riciclo interna limitata e della convenienza economica ad affidarsi a paesi con impianti più avanzati. Il riciclo interno cresce gradualmente, proporzionato alla domanda, senza investimenti straordinari che accelerino lo sviluppo della filiera. Il riutilizzo in seconda vita rimane un'opzione, ma senza una netta predominanza rispetto al riciclo. Questo scenario permette di analizzare come il sistema potrebbe evolversi in modo spontaneo e senza forti pressioni politiche o industriali, fornendo un punto di riferimento rispetto a scenari più ambiziosi o estremi. La sua rilevanza sta nel valutare se l'attuale bilanciamento tra esportazione e riciclo interno sia sostenibile nel lungo periodo o se, con l'aumento delle batterie esauste, potrebbero emergere criticità nella gestione della filiera. Di seguito, in figura 7, sono riportati i risultati di questo scenario.

Figura 7: Risultati BAU 1



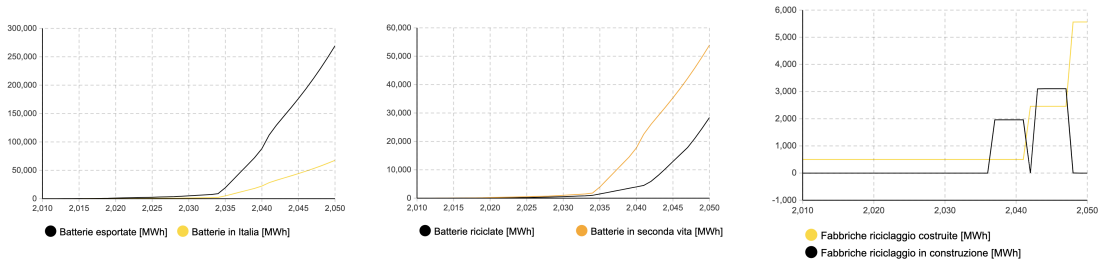
Costi di investimento: 102,025,000 euro;

Costi totali (investimento + variabili): 276,735,154 euro.

4.1.2 BAU 2: 80% export; riciclo 20% - riutilizzo 80%; gap alto

Questo scenario rappresenta un'evoluzione del sistema in cui l'Italia continua a esportare una quota significativa delle batterie a fine vita (80%), riducendo il fabbisogno di impianti di riciclo interni, e massimizza il riutilizzo delle batterie in seconda vita (80%), limitando ulteriormente il flusso di batterie destinate al riciclo immediato. La scelta di analizzare questo scenario è motivata dalla necessità di comprendere l'impatto di una strategia industriale che privilegia la gestione delle batterie attraverso l'export e il riutilizzo, piuttosto che tramite un'espansione della capacità di riciclo nazionale. L'Italia, attualmente, non dispone di un'infrastruttura di riciclo delle batterie agli ioni di litio pienamente sviluppata e gran parte delle batterie esauste vengono inviate all'estero, principalmente in paesi con impianti più avanzati come la Germania e la Cina. Questo scenario esplora le conseguenze di un mantenimento di questa tendenza. Un altro aspetto chiave di questo scenario è l'ampio riutilizzo delle batterie in applicazioni di seconda vita, come i sistemi di accumulo per le energie rinnovabili. L'Italia sta investendo sempre di più nelle rinnovabili, con un crescente bisogno di sistemi di accumulo per stabilizzare la rete elettrica e compensare la variabilità della produzione da fonti eoliche e solari. In questo contesto, il riutilizzo massivo delle batterie esauste potrebbe rappresentare un'opportunità per ridurre la dipendenza dalle importazioni di nuove batterie e migliorare la sicurezza energetica del Paese. È importante però valutare se un elevato riutilizzo possa portare a una carenza di materiali critici per la produzione di nuove batterie, ritardando lo sviluppo di una filiera nazionale del riciclo. Analizzare questo scenario consente quindi di comprendere i limiti e i benefici di una strategia in cui l'Italia mantiene un ruolo passivo nella filiera del riciclo, affidandosi prevalentemente all'esportazione e al riutilizzo delle batterie. Di seguito, in figura 8, sono riportati i risultati di questo scenario.

Figura 8: Risultati BAU 2



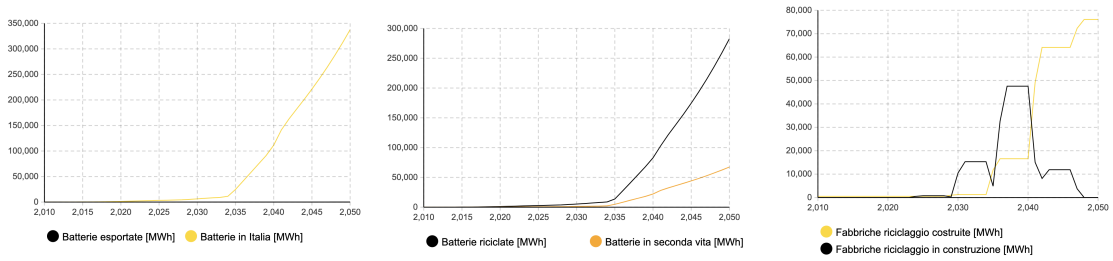
Costi di investimento: 23,100,000 euro;

Costi totali (investimento + variabili): 61,962,292 euro.

4.1.3 BAU 3: 0% export; riciclo 80% - riutilizzo 20%; gap basso

Questo scenario rappresenta un'ipotesi in cui l'Italia decide di non dipendere più dall'export per la gestione delle batterie esauste, sviluppando un'infrastruttura nazionale capace di trattare internamente il 100% delle batterie a fine vita. In questo contesto, la quota di esportazione viene azzerata, mentre il tasso di riciclo diretto viene portato all'80%, limitando al minimo il riutilizzo in seconda vita. Inoltre, il gap di investimento è impostato su un valore basso, il che significa che il sistema reagisce rapidamente alle variazioni della domanda di riciclo, attivando nuovi investimenti ogni volta che la capacità esistente si avvicina alla saturazione. Questo consente di sviluppare la capacità impiantistica in modo costante nel tempo, evitando periodi di sovraccarico che potrebbero compromettere l'efficienza del sistema. Attualmente, l'Italia non dispone di impianti di riciclo delle batterie agli ioni di litio su larga scala e una parte significativa delle batterie esauste viene inviata all'estero per il trattamento. Tuttavia, con la crescente diffusione della mobilità elettrica, questa dipendenza dall'estero potrebbe diventare una criticità strategica. L'Unione Europea sta già adottando misure per promuovere il recupero dei materiali critici e il Regolamento (UE) 2023/1542 (European Parliament and Council of the European Union (2023)) impone quote minime di riciclo da rispettare nei prossimi decenni. In questo scenario, si assume che l'Italia adotti una politica industriale mirata a sviluppare un ecosistema del riciclo nazionale, riducendo la dipendenza da paesi terzi e aumentando la disponibilità interna di materiali strategici come litio, nichel e cobalto. L'azzeramento dell'export e la scelta di un gap basso per gli investimenti impongono la necessità di aumentare in modo costante e progressivo la capacità di riciclo nazionale. Questo approccio consente di evitare colli di bottiglia nella gestione delle batterie esauste, distribuendo gli investimenti nel tempo invece di concentrarli in pochi periodi con forte sovraccarico della rete impiantistica. Un valore basso del gap permette al sistema di adattarsi dinamicamente alla domanda, costruendo nuovi impianti prima che la capacità esistente raggiunga la saturazione. Dal punto di vista ambientale, uno scenario con massimo riciclo e nessuna esportazione potrebbe ridurre l'impatto ecologico legato al trasporto delle batterie verso impianti esteri, abbassando le emissioni associate alla logistica. Inoltre, un tasso di riciclo dell'80% consentirebbe di massimizzare il recupero di materiali critici, riducendo la dipendenza dell'Italia dall'importazione di materie prime vergini, in linea con le strategie di economia circolare promosse dall'UE. Questo scenario è stato scelto per valutare la fattibilità di una transizione verso un sistema più indipendente e resiliente, mettendo in evidenza le sfide economiche e infrastrutturali che un'implementazione su larga scala comporterebbe. La combinazione di un basso gap di investimento e una politica di massimo riciclo permette di testare un modello in cui la capacità di trattamento si espande in modo graduale e costante, minimizzando il rischio di saturazione del sistema e garantendo un adattamento più efficiente alle esigenze future. I risultati ottenuti permettono di confrontare i costi e i benefici di un modello di autosufficienza rispetto a strategie più flessibili, come quelle in cui l'export o il riutilizzo giocano un ruolo maggiore.

Figura 9: Risultati BAU 3



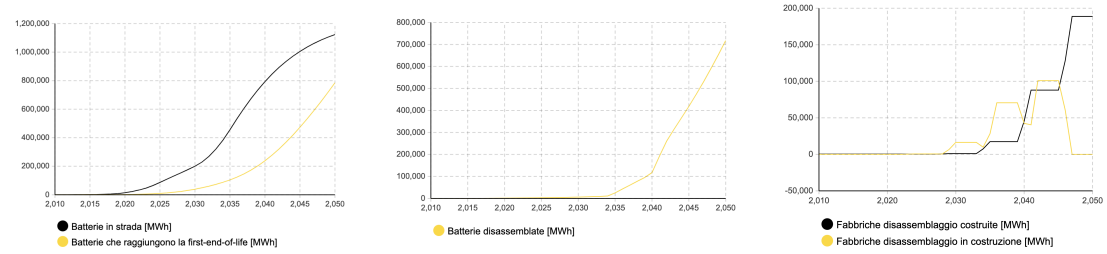
Costi di investimento: 304,150,000 euro;

Costi totali (investimento + variabili): 827,132,450 euro.

4.2 Scenari Internal Combustion Engine Ban (ICE BAN)

Gli scenari ICE BAN rappresentano un'evoluzione del sistema in cui viene imposto il divieto di vendita di nuovi veicoli con motore a combustione interna (Internal Combustion Engine, ICE) entro una determinata scadenza, seguendo le direttive europee sulla decarbonizzazione dei trasporti. Questo tipo di scenario è particolarmente rilevante nel contesto italiano ed europeo, in quanto l'Unione Europea ha già fissato al 2035 la data limite per la vendita di auto con motori termici, con l'obiettivo di accelerare la transizione verso la mobilità elettrica e ridurre le emissioni di CO_2 legate al settore dei trasporti. L'introduzione di un divieto definitivo sui veicoli ICE implica una trasformazione radicale della flotta circolante e avrà un impatto significativo sulla gestione del fine vita delle batterie agli ioni di litio. Con la progressiva elettrificazione del parco veicoli, si prevede un forte incremento del numero di batterie esauste a partire dal 2035, che devono essere smontate, trattate e riciclate per evitare problemi ambientali e per garantire il recupero di materiali critici come litio, cobalto e nichel. La gestione efficiente di questo flusso di batterie diventa quindi un elemento chiave per la sostenibilità della transizione elettrica. Di seguito, in figura 10, sono riportati i risultati generali dello scenario ICE BAN.

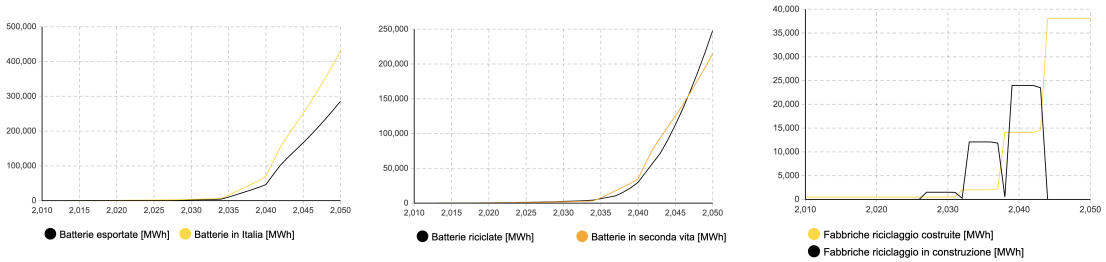
Figura 10: Risultati generali ICE BAN



4.2.1 ICE BAN 1: 40% export; riciclo 50% - riutilizzo 50%; gap medio

Questo scenario analizza l'impatto dell'eliminazione dei veicoli a combustione interna mantenendo un sistema di gestione delle batterie che combina una dipendenza moderata dall'export (40%) e una distribuzione equilibrata tra riciclo diretto e seconda vita (50%-50%). A differenza del Business As Usual, dove la transizione è più graduale, l'ICE BAN impone un'accelerazione del turnover del parco veicoli, con un conseguente aumento più rapido del numero di batterie esauste. Un elemento chiave in questo scenario è il gap di investimento medio, che consente di espandere la capacità impiantistica solo quando la domanda di trattamento si avvicina alla saturazione, evitando sia un'espansione prematura che ritardi eccessivi. Questo approccio riflette un sistema che si adatta progressivamente alla crescita della domanda di riciclo, senza sovrainvestimenti iniziali ma con una risposta tempestiva all'incremento del volume di batterie esauste. L'analisi di questo scenario è fondamentale per valutare se, in un contesto di transizione forzata e rapida, una strategia di gestione equilibrata possa garantire stabilità economica e infrastrutturale senza generare colli di bottiglia. Aumentare la quota di riciclo diretto rispetto agli scenari BAU potrebbe ridurre la dipendenza dall'importazione di materie prime, ma mantenere un livello di esportazione ancora significativo lascia aperta la questione della vulnerabilità a decisioni politiche e industriali esterne. I risultati ottenuti aiutano a comprendere se un modello misto di gestione possa essere sostenibile in un contesto di transizione accelerata come quello imposto dall'ICE BAN. Di seguito, in figura 11, sono riportati i risultati di questo scenario.

Figura 11: Risultati ICE BAN 1



Costi di investimento: 152,075,000 euro;

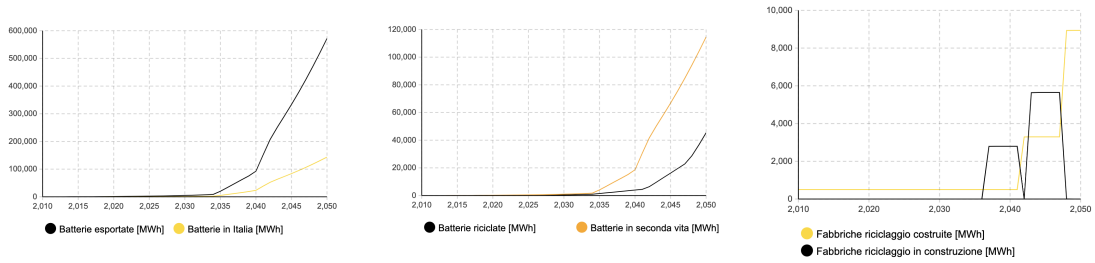
Costi totali (investimento + variabili): 414,347,960 euro.

4.2.2 ICE BAN 2: 80% export; riciclo 20% - riutilizzo 80%; gap alto

Questo scenario analizza l'effetto dell'eliminazione dei veicoli a combustione interna in un contesto in cui l'Italia mantiene una forte dipendenza dall'export (80%) per la gestione delle batterie esauste e privilegia il riutilizzo in seconda vita (80%) rispetto

al riciclo diretto. A differenza di altri scenari ICE BAN, qui si esplora una strategia in cui la capacità impiantistica nazionale di riciclo rimane limitata, mentre la gestione delle batterie avviene principalmente tramite la loro esportazione e il prolungamento della loro vita utile. La scelta di un gap di investimento alto implica che nuovi impianti vengano costruiti solo quando il sistema raggiunge un livello critico di saturazione, riducendo gli investimenti iniziali e lasciando che la capacità si espanda solo quando strettamente necessario. Questo approccio permette di minimizzare i costi nel breve termine, ma potrebbe comportare il rischio di colli di bottiglia nel momento in cui il riutilizzo non fosse sufficiente a gestire l'elevato flusso di batterie esauste. L'obiettivo di questo scenario è valutare se una strategia basata su minimi investimenti interni e massima esternalizzazione della gestione delle batterie possa essere sostenibile in un contesto di transizione accelerata come quello imposto dall'ICE BAN. Se da un lato ridurre la necessità di nuove infrastrutture può abbassare i costi iniziali, dall'altro la forte dipendenza dall'estero potrebbe esporre il sistema a vulnerabilità legate a normative e capacità impiantistiche di altri paesi. Inoltre, un massiccio riutilizzo delle batterie potrebbe ridurre il recupero di materiali critici, limitando l'approvvigionamento interno per la produzione di nuove batterie. I risultati di questa simulazione aiutano a comprendere se un modello del genere possa garantire stabilità a lungo termine o se, al contrario, richieda correzioni per evitare squilibri nella filiera del riciclo. Di seguito, in figura 12, sono riportati i risultati di questo scenario.

Figura 12: Risultati ICE BAN 2



Costi di investimento: 36,575,000 euro;

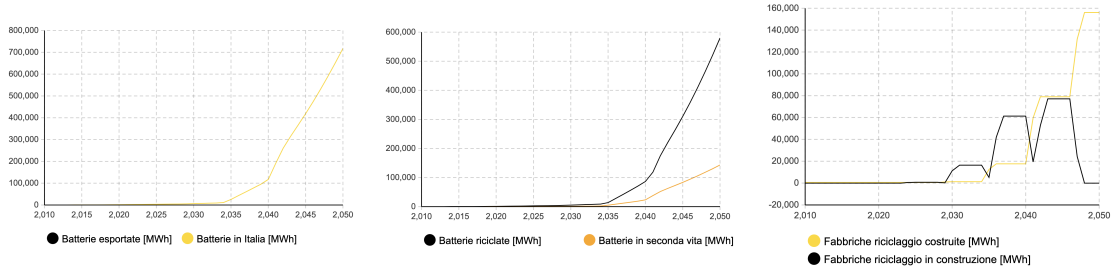
Costi totali (investimento + variabili): 98,401,259 euro.

4.2.3 ICE BAN 3: 0% export; riciclo 80% - riutilizzo 20%; gap basso

In questo scenario, l'eliminazione dei veicoli a combustione interna è accompagnata da una strategia di gestione delle batterie basata su autosufficienza totale: nessuna esportazione (0%) e massimo riciclo diretto (80%). A differenza degli altri scenari ICE BAN, qui si ipotizza un forte impegno industriale per creare una filiera del riciclo nazionale, eliminando la dipendenza da impianti esteri e garantendo un alto tasso di recupero dei materiali critici. Dal punto di vista degli investimenti, la scel-

ta di un gap di investimento basso implica che il sistema reagisce rapidamente alle variazioni della domanda di riciclo, attivando nuovi impianti in modo progressivo prima che si verifichino criticità nella capacità impiantistica. Questo consente di evitare ritardi strutturali, ma comporta anche una distribuzione più frammentata degli investimenti nel tempo, con un impegno finanziario continuo per l'espansione della capacità. L'analisi di questo scenario è particolarmente rilevante per valutare la fattibilità economica e infrastrutturale di un modello in cui l'Italia si assume la piena gestione delle proprie batterie a fine vita. Se da un lato questa strategia riduce la dipendenza da politiche estere e garantisce un accesso più stabile ai materiali riciclati per la produzione di nuove batterie, dall'altro richiede elevati investimenti iniziali e una pianificazione industriale strutturata per evitare sovracapacità o inefficienze nella distribuzione degli impianti. I risultati di questa simulazione aiutano a comprendere se un sistema basato su una forte autonomia impiantistica possa essere economicamente sostenibile e quali strategie di finanziamento e sviluppo possano rendere questa transizione realizzabile nel lungo periodo. Di seguito, in figura 13, sono riportati i risultati di questo scenario.

Figura 13: Risultati ICE BAN 3



Costi di investimento: 623,700,000 euro;

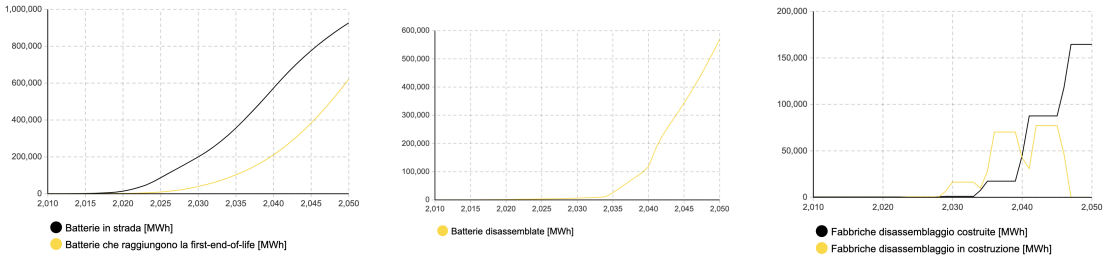
Costi totali (investimento + variabili): 1,696,134,260 euro.

4.3 Scenari NET ZERO

Gli scenari NET ZERO rappresentano un'evoluzione del sistema in cui l'Italia si impegna a raggiungere emissioni nette zero nel settore della mobilità entro il 2050, in linea con gli obiettivi climatici europei e con il Green Deal Europeo. Questo significa che la transizione ai veicoli elettrici non è solo accelerata da regolamenti come nel caso degli scenari ICE BAN, ma è parte di una strategia più ampia per decarbonizzare l'intero settore, riducendo al minimo le emissioni lungo l'intera filiera, inclusi il riciclo e il riutilizzo delle batterie. Rispetto agli scenari ICE BAN, gli scenari NET ZERO prevedono una transizione più graduale, senza un divieto assoluto imposto in una data specifica, ma con una progressiva sostituzione dei veicoli a combustione interna attraverso incentivi, regolamenti sulle emissioni e investimenti nelle infrastrutture di ricarica. Questa progressività implica un aumento costante

e prevedibile del numero di batterie a fine vita, evitando i picchi improvvisi che caratterizzano le simulazioni con una scadenza rigida per la vendita di veicoli ICE. Un elemento fondamentale di questi scenari è l'ottimizzazione della gestione delle batterie esauste, bilanciando il riciclo diretto, il riutilizzo in seconda vita e l'export. Poiché la sostenibilità è al centro dell'approccio NET ZERO, è particolarmente rilevante l'analisi degli investimenti necessari per rendere il riciclo più efficiente e diffuso, evitando che una transizione accelerata alla mobilità elettrica porti a nuove dipendenze da materie prime vergini. Di seguito, in figura 14, sono riportati i risultati generali dello scenario NET ZERO.

Figura 14: Risultati generali NET ZERO

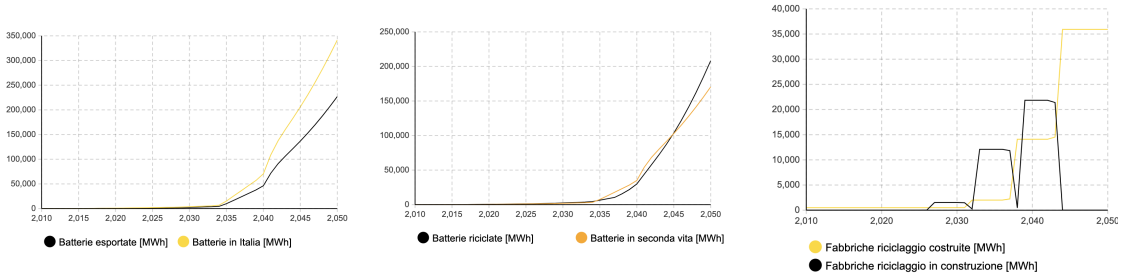


4.3.1 NET ZERO 1: 40% export; riciclo 50% - riutilizzo 50%, gap medio

Questo scenario analizza l'evoluzione del sistema in un contesto in cui l'Italia persegue l'obiettivo di emissioni nette zero nella mobilità, mantenendo una gestione equilibrata delle batterie esauste. Si ipotizza che il 40% delle batterie venga esportato per il trattamento all'estero, mentre il restante 60% venga gestito internamente con una distribuzione bilanciata tra riciclo diretto (50%) e seconda vita (50%). L'elemento chiave di questo scenario è il gap di investimento medio, che permette al sistema di adattarsi progressivamente all'aumento della domanda di riciclo, attivando nuovi impianti solo quando necessario, senza eccessive rigidità né ritardi. Questo approccio consente di ottimizzare gli investimenti, evitando un'espansione prematura della capacità impiantistica, ma garantendo comunque un adeguato sviluppo della rete di trattamento delle batterie. Rispetto agli scenari ICE BAN, dove la transizione è più brusca, lo scenario NET ZERO prevede una crescita più graduale del numero di batterie esauste, permettendo agli impianti di riciclo e disassemblaggio di adattarsi in modo più sostenibile nel tempo. L'equilibrio tra export, riciclo e riutilizzo consente di valutare se una gestione bilanciata possa offrire vantaggi economici e infrastrutturali rispetto a strategie più polarizzate, come quelle basate su un'elevata dipendenza dall'export o su un'autosufficienza totale. L'analisi di questo scenario permette di comprendere se un modello misto sia in grado di garantire la sostenibilità a lungo termine, mantenendo costi sotto controllo e assicurando una capacità di trattamento in linea con l'evoluzione della mobilità elettrica, senza eccessive vulnerabilità legate alla dipendenza da impianti esteri o alla necessità di

investimenti troppo concentrati nel tempo. Di seguito, in figura 15, sono riportati i risultati di questo scenario.

Figura 15: Risultati NET ZERO 1



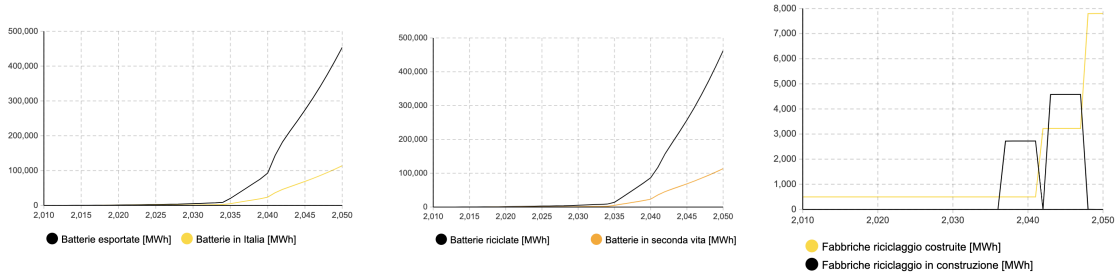
Costi di investimento: 144,375,000 euro;

Costi totali (investimento + variabili): 391,454,866 euro.

4.3.2 NET ZERO 2: 80% export; riciclo 20% - riutilizzo 80%, gap alto

Questo scenario analizza l'evoluzione del sistema in un contesto di transizione verso le emissioni nette zero, mantenendo un'elevata dipendenza dall'estero per la gestione delle batterie esauste. Si ipotizza che l'80% delle batterie venga esportato, riducendo al minimo la necessità di infrastrutture di riciclo interne, mentre il restante 20% venga trattato principalmente attraverso il riciclo diretto. Dal punto di vista del modello di investimento, viene adottato un gap elevato, il che significa che gli impianti di riciclo vengono ampliati solo quando la capacità esistente raggiunge livelli critici di saturazione. Questo approccio porta a investimenti ritardati, con il rischio che il sistema si trovi sotto pressione nel momento in cui la quantità di batterie a fine vita superi improvvisamente la capacità di trattamento disponibile. Rispetto agli scenari ICE BAN, in cui l'aumento della domanda di riciclo è più repentino, lo scenario NET ZERO consente una crescita più graduale del flusso di batterie esauste. Tuttavia, la scelta di posticipare gli investimenti potrebbe portare a colli di bottiglia nel sistema, specialmente se le possibilità di esportazione dovessero ridursi a causa di vincoli normativi o di capacità nei paesi destinatari. L'obiettivo dell'analisi di questo scenario è comprendere se una strategia basata su un basso livello di investimenti interni e un'elevata esportazione possa essere sostenibile nel lungo periodo, oppure se comporti rischi strutturali per la filiera del riciclo. Di seguito, in figura 16, sono riportati i risultati di questo scenario.

Figura 16: Risultati NET ZERO 2



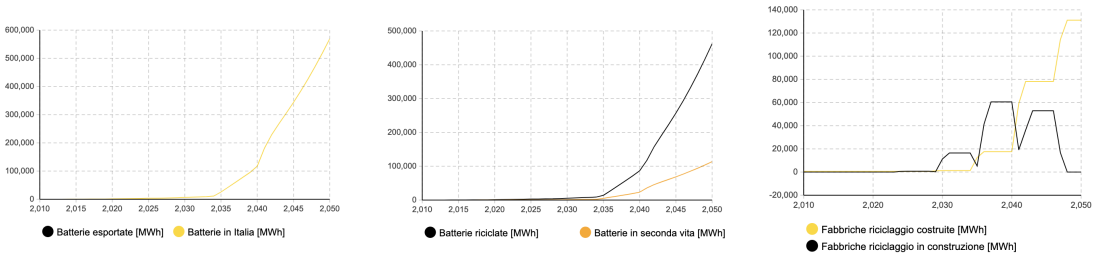
Costi di investimento: 32,725,000 euro;

Costi totali (investimento + variabili): 86,301,326 euro.

4.3.3 NET ZERO 3: 0% export; riciclo 80% - riutilizzo 20%, gap basso

Questo scenario rappresenta un'ipotesi in cui l'Italia, nell'ambito della transizione verso le emissioni nette zero, sceglie di sviluppare un sistema completamente autosufficiente per la gestione delle batterie esauste. Si assume che l'export venga completamente azzerato (0%), mentre il riciclo diretto raggiunge l'80%, limitando l'impiego delle batterie in seconda vita. L'obiettivo è quello di ridurre al minimo la dipendenza da impianti esteri e massimizzare il recupero di materiali critici all'interno del Paese, contribuendo così alla creazione di una filiera circolare delle batterie. Dal punto di vista del modello di investimento, questo scenario prevede un gap basso, il che significa che gli impianti vengono costruiti o ampliati in anticipo rispetto alla saturazione della capacità esistente. Questo approccio consente di mantenere un sistema di trattamento delle batterie sempre in linea con la domanda, evitando colli di bottiglia e ritardi che potrebbero compromettere la sostenibilità del sistema nel lungo periodo. La strategia di investimenti anticipati, però, comporta un impegno economico significativo fin dalle fasi iniziali, con la necessità di coordinare la crescita del settore del riciclo con politiche industriali e strumenti finanziari adeguati. Rispetto agli scenari ICE BAN, caratterizzati da una transizione più brusca, gli scenari NET ZERO prevedono un incremento più graduale del numero di batterie esauste, permettendo una pianificazione più efficace della capacità impiantistica. Tuttavia, la scelta di un sistema completamente autonomo richiede un alto livello di investimenti e una forte capacità di adattamento alle evoluzioni tecnologiche del settore. L'analisi di questo scenario è fondamentale per comprendere se una strategia di massima indipendenza possa essere economicamente sostenibile e in grado di garantire una gestione efficace delle batterie a fine vita. I risultati ottenuti permetteranno di valutare la fattibilità di una filiera del riciclo interamente nazionale e di confrontarla con approcci più flessibili, in cui l'export e la seconda vita delle batterie giocano un ruolo maggiore. Di seguito, in figura 17, sono riportati i risultati di questo scenario.

Figura 17: Risultati NET ZERO 3



Costi di investimento: 523,600,000 euro;

Costi totali (investimento + variabili): 1,423,923,346 euro.

4.4 Risultati a confronto

Sono di seguito riportate alcune tabelle che hanno lo scopo di confrontare tra di loro i risultati ottenuti con le varie simulazioni sopra esplicitate, in modo che possano essere di facile interpretazione e possano essere agevolmente confrontati tra loro, con l'obiettivo di fornire un chiaro quadro dei vari contesti e dell'eventuale applicabilità dei vari valori parametrici proposti. In seguito, nel capitolo della discussione, i confronti sono esplicitati ed i punti salienti analizzati, interpretati ed utilizzati per definire i punti fondamentali dell'analisi e trarre le appropriate conclusioni a riguardo.

Scenario	**Batterie in strada [kWh]**	**Cumulata batterie a fine vita [kWh]**
BAU 1	503,313,196.95	364,699,323.91
BAU 2	503,313,196.95	364,699,323.91
BAU 3	503,313,196.95	364,699,323.91
ICE BAN 1	1,123,169,517.51	785,053,048.72
ICE BAN 2	1,123,169,517.51	785,053,048.72
ICE BAN 3	1,123,169,517.51	785,053,048.72
NET ZERO 1	926,665,755.48	621,696,388.58
NET ZERO 2	926,665,755.48	621,696,388.58
NET ZERO 3	926,665,755.48	621,696,388.58

Tabella 13: Confronto tra batterie in strada e batterie a fine vita nei diversi scenari

Scenario	Cumulata batterie esportate [kWh]	Cumulata batterie non esportate [kWh]
BAU 1	134,663,344.42	202,597,379.10
BAU 2	269,326,688.81	67,532,459.70
BAU 3	0	337,662,298.47
ICE BAN 1	286,122,400.85	430,683,518.53
ICE BAN 2	572,244,797.86	143,561,171.94
ICE BAN 3	0	717,805,864.22
NET ZERO 1	226,991,169.09	341,652,178.11
NET ZERO 2	453,982,338.18	113,884,059.37
NET ZERO 3	0	569,420,296.84

Tabella 14: Confronto tra batterie esportate e batterie non esportate nei diversi scenari

Scenario	Cumulata batterie riciclate [kWh]	Cumulata batterie in seconda vita [kWh]
BAU 1	132,176,140.77	101,132,969.92
BAU 2	28,432,849.61	53,937,583.95
BAU 3	282,853,944.45	67,421,979.93
ICE BAN 1	248,101,984.36	214,928,586.00
ICE BAN 2	45,371,827.67	114,628,578.58
ICE BAN 3	579,933,388.88	143,285,724.23
NET ZERO 1	208,389,226.75	170,505,406.20
NET ZERO 2	40,508,249.28	90,936,216.65
NET ZERO 3	462,390,799.34	113,670,270.80

Tabella 15: Confronto tra batterie riciclate e batterie in seconda vita nei diversi scenari

Scenario	Capacità aggiunta disassemblaggio [kWh]	Capacità aggiunta riciclo [kWh]
BAU 1	98,994,986.79	25,360,221.37
BAU 2	98,994,986.79	5,564,230.26
BAU 3	98,994,986.79	76,060,259.25
ICE BAN 1	188,798,949.63	38,051,736.71
ICE BAN 2	188,798,949.63	8,936,762.89
ICE BAN 3	188,798,949.63	156,114,151.61
NET ZERO 1	164,576,972.90	35,922,795.85
NET ZERO 2	164,576,972.90	7,799,450.76
NET ZERO 3	164,576,972.90	131,107,522.90

Tabella 16: Confronto tra capacità aggiunta di disassemblaggio e riciclo nei diversi scenari

Scenario	Impianti grandi [#]	Impianti medi [#]	Impianti piccoli [#]
BAU	47	40	0
ICE BAN	89	76	0
NET ZERO	77	66	1

Tabella 17: Numero di impianti di disassemblaggio per categoria nei diversi scenari

Scenario	Costo di investimento disassemblaggio [euro]	Costo totale disassemblaggio [euro]
BAU	399,822,500.00	495,624,100.12
ICE BAN	757,872,500.00	940,581,160.94
NET ZERO	657,916,875.00	817,190,190.87

Tabella 18: Costi di investimento e costi totali di disassemblaggio nei diversi scenari

Scenario	Impianti piccoli [#]	Impianti medi [#]	Impianti grandi [#]
BAU 1	3	13	6
BAU 2	4	2	1
BAU 3	4	39	19
ICE BAN 1	5	19	9
ICE BAN 2	3	4	2
ICE BAN 3	4	80	40
NET ZERO 1	3	18	9
NET ZERO 2	1	4	2
NET ZERO 3	2	67	34

Tabella 19: Numero di impianti di riciclo per categoria nei diversi scenari

Scenario	Costo di investimento riciclo [euro]	Costo totale riciclo [euro]
BAU 1	102,025,000.00	276,735,154.98
BAU 2	23,100,000.00	61,962,292.03
BAU 3	304,150,000.00	827,132,450.53
ICE BAN 1	152,075,000.00	414,347,960.61
ICE BAN 2	36,575,000.00	98,401,259.33
ICE BAN 3	623,700,000.00	1,696,134,260.38
NET ZERO 1	144,375,000.00	391,454,866.27
NET ZERO 2	32,725,000.00	86,301,326.73
NET ZERO 3	523,600,000.00	1,423,923,346.73

Tabella 20: Costi di investimento e costi totali di riciclo nei diversi scenari

5 Discussione dei risultati ottenuti

Una cosa che si può subito notare dai risultati del capitolo precedente è che in tutti gli stock considerati cumulativamente nel tempo ed anche dai risultati provenienti dall'ottimizzazione lineare si può evincere un certo parallelismo. Gli scenari dell'ICE BAN producono negli stock una capacità energetica legata alle batterie sempre maggiore degli scenari NET ZERO, i quali a loro volta possiedono sempre valori più elevati rispetto ai loro corrispettivi BAU. Ciò vale a parità di condizioni considerate, ovvero ponendo a confronto tra i tre scenari le condizioni 1, le condizioni 2 o le condizioni 3 reciprocamente, senza mischiarle tra loro. Ciò ha perfettamente senso in quanto in maniera crescente partendo dal Business as Usual e passando per il NET ZERO sino a raggiungere l'ICE BAN si hanno quantità di vetture elettriche sempre maggiori e ciò per forza di cose, a parità di condizioni, porterà a maggiori batterie e capacità energetiche da trattare a fine vita e di conseguenza a maggiori investimenti.

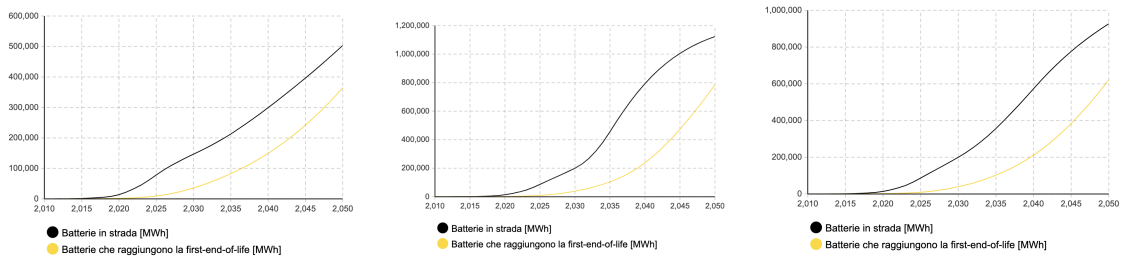
Di seguito si procede con l'analisi dei risultati, seguendo la seguente struttura: sono innanzitutto effettuate alcune analisi preliminari riguardo gli aspetti più interessanti riscontrabili nei risultati soprastanti, principalmente inerenti il mercato delle batterie e dei veicoli elettrici e gli investimenti. Viene poi fatta un'analisi relativa al disassemblaggio nei tre scenari BAU, ICE BAN e NET ZERO. Successivamente sono confrontati tra loro gli scenari aventi parametri analoghi su differenti condizioni di mercato di base (ad esempio BAU 1, NET ZERO 1 e ICE BAN 1): l'obiettivo è capire quali condizioni di azione e di strategia sono veramente consoni a un determinato tipo di scenario economico e politico, cercando di comprendere tra gli scenari ICE BAN, NET ZERO e BAU e alla luce delle analisi precedenti quale potrebbe essere il miglior valore da assegnare ai parametri in quel contesto. Infine, si cerca di capire quale sia il più probabile tra gli scenari che si potrebbe verificare in futuro e così facendo si delinea in seguito alla discussione sui vari parametri lo scenario generale più probabile e le conseguenze delle scelte del Paese sullo stesso.

5.1 Considerazioni preliminari

Pacchi batteria in strada e fine prima vita Per quanto riguarda il numero di pacchi batteria presenti sulle strade italiane nei tre diversi scenari analizzati, ovvero BAU, ICE BAN e NET ZERO, è possibile osservare i grafici che identificano lo stock *ev batteries first life*. Tale stock, il cui funzionamento di carico e scarico è espresso nel capitolo della metodologia, indica quale sia il numero di veicoli elettrici (e quindi di batterie) che sono presenti sulle strade italiane anno per anno. Può essere interessante confrontarlo con il grafico rappresentante la cumulata invece di batterie che raggiungono il proprio primo fine vita, per capire nei diversi scenari come cambia il loro numero e quanti ipotetici "rifiuti" si andrebbero a produrre se non si decidesse di dare una nuova vita alle batterie o si decidesse di stoccarle senza riciclarle o destinarle ad uno smaltimento non idoneo e senza recupero di materiali

critici. I valori espressi dai grafici degli stock hanno come unità di misura i MWh, ma è possibile capire quante batterie sono presenti come numero semplicemente con una conversione, utilizzando la capacità media delle batterie che varia nel corso degli anni. Per semplicità di calcolo e per avere subito l'occhio su considerazioni generali la capacità media viene considerata media non solo temporalmente ma anche tra NMC ed LFP, in modo da ottenere un valore unico che possa essere utilizzato per calcolare velocemente ed in modo aggregato una stima del numero di batterie presenti. Per calcoli più puntuali bisognerebbe andare a calcolare anno per anno esattamente il numero di batterie LFP ed NMC che sono presenti sul mercato per suddividere in modo esatto i valori di capacità presenti nello stock, ma per avere un'idea dell'ordine di grandezza del numero di batterie non è necessario. Si può quindi moltiplicare per 1000 il valore in MWh preso dai grafici, in modo da ottenere i kWh, oppure prenderlo dalle tabelle dei risultati direttamente in kWh e successivamente dividerlo per i $\frac{kWh}{battery}$ medi calcolati dal modello di simulazione (capacità media dei pacchi batteria). Per trovare il numero di batterie cumulate a fine prima vita il conto è lo stesso ma il valore di capacità dello stock *first end of life* va diviso per 0.74, ovvero il valore medio che esprime la capacità rimanente delle batterie dopo il primo fine vita, come indicato nel capitolo della metodologia. Questa correzione è necessaria per ottenere un dato realistico: infatti, senza questa conversione, il calcolo diretto tramite la capacità media restituirebbe un numero inferiore di batterie, in quanto la capacità persa nel tempo influenzerebbe erroneamente il conteggio effettivo delle unità in circolazione. Osservando i grafici a confronto (figura 18) e calcolando i valori si possono trarre alcune conclusioni.

Figura 18: Confronto tra i tre scenari: prima vita e primo fine vita



Considerando i valori al 2050 e considerando i dati puntuali delle tabelle di confronto del capitolo dei risultati, attraverso la conversione tramite la capacità media partendo dai valori di tabella 13 si ottengono i seguenti risultati, presentati in tabella 21.

Scenario	**Batterie in strada nel 2050**	**Cumulata batterie che hanno raggiunto il primo fine vita**
BAU	8,728,984	8,547,293
ICE BAN	19,479,180	18,398,933
NET ZERO	16,071,206	14,570,417

Tabella 21: Valori batterie in strada al 2050 e cumulata batterie che hanno raggiunto la fine prima vita dal 2010 al 2050

Osservando le curve delle *batterie in strada* è possibile notare come nel caso BAU la crescita del numero di batterie in strada segua un andamento quasi lineare e ciò è coerente con la definizione stessa dello scenario. Nel Business as Usual non c'è una direttiva particolare che impone l'acquisto di vetture elettriche e il loro utilizzo cresce linearmente nel tempo con l'avanzare del progresso tecnologico e con la sostituzione naturale della vecchia tecnologia con una nuova, che sarà sempre più ottimizzata e desiderata dai consumatori che però continueranno ancora a utilizzare anche altri tipi di vetture senza vincoli, non saturando il mercato delle auto con solo automobili elettriche. Ciò fa sì che al 2050 ci sia ancora molto potenziale mercato aperto per le automobili elettriche dato che solo una parte della popolazione, non per forza così ingente sul totale, le avrà acquistate. Per quanto invece riguarda lo scenario NET ZERO e in modo ancora più accentuato lo scenario ICE BAN, l'andamento della presenza delle auto elettriche (e delle batterie) in strada segue una curva ad S, tipica curva rappresentante il ciclo di vita di un prodotto tecnologico e innovativo. Nella fase iniziale, l'acquisizione è lenta lineare, coerentemente a quanto accade nello scenario BAU. Quando poi le normative iniziano ad imporre di acquistare auto elettriche si ha una crescita repentina, circa dal 2030 al 2040, più accentuata nell'ICE BAN rispetto al NET ZERO, nel quale non ci sono obblighi diretti riguardo le autovetture elettriche ma gli obiettivi europei di sostenibilità premono comunque fortemente sulla loro acquisizione. Una volta che il mercato è quasi saturato e la maggior parte della popolazione possiede una vettura elettrica la curva tende ad aumentare ma con margini decrescenti, dato che la vita delle batterie si è allungata e molti possiedono già un'auto elettrica senza bisogno di acquistarne una nuova. Ecco che a questo punto il mercato si stabilizza e le vendite diminuiscono. Tutto ciò è perfettamente coerente con la definizione stessa degli scenari analizzati. È interessante notare come la curva di acquisizione di una tecnologia segua sempre solitamente un andamento ad S e infatti a lungo andare anche nello scenario BAU la curva avrebbe probabilmente questo andazzo, ma semplicemente in modo più naturale e a lungo termine, magari nell'arco del doppio degli anni rispetto all'ICE BAN. Le normative europee dell'ICE BAN infatti contribuiscono alla velocizzazione estrema del processo di acquisizione delle vetture elettriche, facendo completare l'andamento ad S della curva in molto meno tempo (non a caso la parte iniziale della curva dell'ICE BAN fino al 2030 è pressoché identica all'intera curva BAU dal 2010 al 2050, ad indicare che lo scenario BAU avrebbe lo stesso andamento dell'ICE BAN ma molto più dilatato nel tempo e nella simulazione non si fa in tempo a notare, mentre l'ICE BAN fa completare la curva in modo molto più rapido e condensato, richiedendo più sforzi ed investimenti per il Paese. Capire se ciò è un bene o un male dipende da molti fattori non solo economici ma anche ambientali e geopolitici che esulano dal fulcro di questa tesi, ma che potrebbero essere oggetto di futuri approfondimenti. Lo scenario NET ZERO è come sempre una via di mezzo tra i due estremi, come ben si può notare dai grafici e dai valori di tabella 21. Il motivo invece per cui si è scelto di rappresentare il valore puntuale delle batterie in strada e invece la cumulata delle batterie a fine vita è per mostrare quanta vicinanza si tenda a raggiungere a fine simulazione tra le due curve e ciò si nota ancora meglio osservando la tabella mostrante il numero di batterie e non i kWh. Continuando a produrre nuove batterie, prima o poi si giungerà al momento in cui tutte quelle che

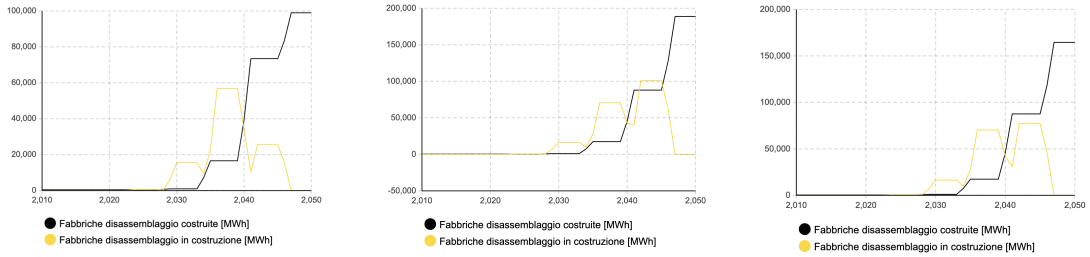
hanno raggiunto il primo fine vita da inizio simulazione saranno maggiori di quelle attualmente sul mercato nella loro prima vita (basta proiettare avanti nel tempo le curve dell'ICE BAN, che è lo scenario di acquisizione più veloce, con l'andazzo che hanno attualmente per notarlo quasi a breve termine). Ciò dimostra l'importanza di investire in impianti di riciclaggio e di disassemblaggio idonei per far fronte a tale situazione molto repentinamente soprattutto nello scenario ICE BAN o l'accumulo di batterie esauste in pochissimo tempo potrebbe crescere esponenzialmente in modo drastico, occupando spazio e rischiando di danneggiare suolo di deposito, paesaggio e ambiente. Negli scenari BAU e NET ZERO è possibile investire anche con più calma ma è comunque necessario farlo al momento giusto e non ignorare la questione per non rimanere sommersi da batterie a fine vita inerti, inutili e potenzialmente dannose.

I grafici degli investimenti Come visto nel capitolo della metodologia ed in quello dei risultati, il modello degli investimenti, che si tratti di disassemblaggio o di riciclo, possiede due stock principali. Il primo è dedicato alle fabbriche in costruzione, il secondo è dedicato alle fabbriche effettivamente costruite. È interessante quindi osservare le curve di andamento dei grafici rappresentativi di tali stock, che hanno delle peculiarità interessanti. La curva inerente alla capacità effettivamente costruita sale o rimane costante nel corso del tempo, ma non scende mai. Questo perché la capacità tende nel corso della simulazione sempre ad aumentare e mai a diminuire. La curva invece delle fabbriche in costruzione aumenta e diminuisce man mano che vengono effettuati gli investimenti: aumenta quando nuove fabbriche entrano in costruzione e diminuisce quando dopo il delay di costruzione esse vengono completate e passano dall'essere in fabbricazione all'essere effettivamente operative. In quel momento si ha una discesa della curva di costruzione e una corrispondente salita di quella delle fabbriche costruite, infatti quando una fabbrica cessa di essere in costruzione diventa operativa effettivamente. Il numero di volte in cui la curva delle fabbriche effettivamente costruite cresce dopo essere stata costante per un periodo indica il numero di investimenti fatti durante l'arco temporale della simulazione. La prima volta in cui invece cresce la curva delle fabbriche in costruzione rappresenta la prima volta in cui si va ad investire. È interessante notare come in ciascuno degli scenari considerati, sia per il disassemblaggio che per il riciclo, si vada a non avere più fabbriche in costruzione al 2050, segno che si riesce in tutti i casi a soddisfare il gap limite richiesto che porta ad investire. Ciò rispecchia bene l'andamento ad S delle curve che rappresentano i veicoli in strada in Italia anno per anno, in quanto una volta che il mercato comincia la sua saturazione, come avviene in ICE BAN e in NET ZERO, è naturale che la capacità aggiunta risulti sufficiente per un periodo più prolungato di tempo. Nell'ICE BAN in particolare, in cui dal 2035 si ha già il 100% del parco veicoli composto da vetture elettriche, è probabile che la capacità raggiunta sia sufficiente per poi molto tempo a causa della precoce saturazione del mercato che farà stabilizzare il numero di veicoli elettrici su un certo valore. Anche nel NET ZERO si può registrare un andamento simile, seppure meno repentino. Interessante è anche il fatto che ciò accada però anche negli scenari BAU, probabilmente a causa dell'aumento della vita media delle batterie e degli investimenti comunque

abbastanza reattivi che vengono effettuati in relazione alla richiesta bassa, media o alta di nuova capacità. Nell'analisi effettuata infatti, la reattività degli investimenti alla domanda crescente di riciclo è stata sempre ponderata (tramite il gap) all'entità della domanda stessa: si è deciso di ipotizzare più reattività negli scenari di tipo 3 per esempio, che sono quelli con domanda maggiore, e reattività minore negli scenari di tipo 2, che hanno domanda minore. Ciò ha sempre consentito di adattare la capacità alla domanda, portando al 2050 ad avere costruito sufficienti fabbriche per soddisfare la domanda. Nel disassemblaggio vale lo stesso in quanto si sono sempre ipotizzati investimenti molto reattivi e la domanda di capacità aggiuntiva cresce in effetti molto velocemente. Tale scelta è stata fatta perché pare realistico che nel caso ci sia un aumento più repentino di domanda la pressione sentita per la necessità di effettuare investimenti in nuovi impianti sia più ingente e possa portare ad una reattività in linea con l'aumento. Nel caso si proseguisse con la simulazione avanti nel tempo, e potrebbe essere un'analisi ulteriore da effettuare in futuro, si potrebbero probabilmente notare comunque ulteriori investimenti in ogni caso in tutti gli scenari, ma sarebbe realistico aspettarsi a lungo termine un maggior numero degli stessi (anche se più piccoli in termini di valore) dilatati nel tempo negli scenari BAU, a crescita più lineare, e meno investimenti negli altri due scenari (i quali hanno già investito molto e velocemente prima), che sono già verso la saturazione del mercato di batterie per veicoli elettrici nel 2050. Si possono ora notare diverse peculiarità dei grafici degli investimenti suddivisi per categoria e scenario, rappresentati anche successivamente nella figura 19:

- **impianti di disassemblaggio**:
  - **BAU**: 3 investimenti effettuati a partire dal 2027 circa, il più ingente è stato il secondo, capacità totale raggiunta alla fine di 98,994,987 kWh; in questo caso la crescita della domanda di disassemblaggio è lineare e quindi non per forza gli investimenti devono essere più ingenti man mano che si va avanti nel tempo. Con il secondo investimento si copre già gran parte della capacità necessaria e quindi il terzo risulta essere minore, anche perché l'aumento poi delle batterie sul mercato fino al 2050 cresce molto più lentamente che negli altri scenari e infatti come terzo investimento questo è il più basso di tutti rispetto al terzo investimento di ICE BAN e di NET ZERO;
  - **ICE BAN**: 3 investimenti effettuati a partire sempre circa dal 2027, come entità degli stessi l'andamento è crescente ed il terzo è il maggiore effettuato, capacità totale raggiunta alla fine di 188,798,949 kWh; in questo caso ha senso che l'andamento del valore degli investimenti sia crescente nel tempo, in quanto la domanda di capacità aggiuntiva aumenta con un'esponenziale molto ripida;
  - **NET ZERO**: 3 investimenti effettuati, sempre circa dal 2027 il secondo e il terzo più alti del primo ma simili tra loro, capacità totale raggiunta alla fine di 164,576,973 kWh; anche qui ha senso che l'andamento del valore di capacità sia crescente nel tempo ma meno drasticamente rispetto all'ICE BAN e infatti il terzo investimento è più grande del secondo ma di poco.

Figura 19: Confronto BAU, ICE BAN, NET ZERO: investimenti per il disassemblaggio



- **impianti di riciclo**:
  - **scenari di tipo 1**: vengono sempre effettuati 3 investimenti. In questi scenari, caratterizzati come visto da una % di export del 40%, da una percentuale di riciclo diretto del 50% rispetto al riutilizzo e da un gap limite per gli investimenti medio, si nota come l'andamento degli investimenti sia crescente nel tempo come valore, e non raggiunge mai quote altissime ma nemmeno bassissime, anche se ovviamente più alte rispetto all'ICE BAN rispetto al NET ZERO e nel NET ZERO rispetto al BAU. L'ordine di grandezza è di decine di milioni di kWh;
  - **scenari di tipo 2**: vengono sempre effettuati due investimenti, molto spostati in avanti nel tempo della simulazione, circa al 2037. In questi scenari, caratterizzati da una % di export dell'80%, da una percentuale di riciclo diretto del 20% rispetto al riutilizzo e da un gap limite per gli investimenti alto, si nota come l'andamento degli investimenti sia molto slittato avanti nel tempo e di un valore sempre esiguo, nell'ordine di pochi milioni di kWh; anche qui i valori sono crescenti partendo dal più basso (BAU) al più alto (ICE BAN); sono questi i casi in cui si decide di essere meno reattivi e di investire meno, basandosi molto sul commercio con l'estero e sul riutilizzo e premendo poco l'acceleratore sul riciclo interno;
  - **scenari di tipo 3**: sono gli scenari in cui vengono effettuati investimenti più alti, 3 per ogni scenario. In questi scenari, caratterizzati da una % di export dello 0%, da una percentale di riciclo diretto dell'80% rispetto al riutilizzo e da un gap limite per gli investimenti basso, si nota come il valore degli investimenti sia molto più alto rispetto al valore degli scenari di tipo 1 e 2 e l'andamento delle curve rispecchia molto quello delle curve di investimento del disassemblaggio, con tutte le considerazioni analoghe che si sono fatte al riguardo. Ciò ha senso in quanto è la condizione in cui si vuole avere maggiore reattività degli investimenti all'aumento della domanda di riciclo e dove si ha più domanda in assoluto, creando una situazione molto simile a quella del disassemblaggio in cui si devono considerare tutte le batterie senza possibilità di considerare parametri come l'export (che infatti qui è a 0) o la distinzione tra riciclo e riutilizzo).

5.2 Disassemblaggio: il ruolo degli investimenti

Per quanto riguarda quindi in particolare gli investimenti per aumentare la capacità di disassemblaggio delle batterie, è necessario considerare innanzitutto lo scenario di riferimento tra BAU (Business As Usual), ICE BAN e NET ZERO. I risultati della simulazione mostrano che il costo di investimento in questo caso è univoco e ben definito, poiché le altre variabili considerate, come l'export delle batterie, il loro trattamento locale o la loro destinazione immediata al riciclo o alla seconda vita, non influenzano le dinamiche della prima fine vita e del disassemblaggio delle stesse, per cui anche il gap tra *disassembly rate* e *disassembly rate target* è mantenuto costante e reattivo a 0.2 per garantire reattività nell'adattare la capacità massima di questi impianti così cruciali. Indipendentemente dalla loro successiva destinazione, le batterie devono comunque essere prima disassemblate, rendendo questa fase del processo un passaggio obbligato e non evitabile. A differenza degli investimenti negli impianti di riciclo, dove esiste un margine decisionale più ampio, nel caso del disassemblaggio le opzioni sono fortemente limitate. L'unico aspetto su cui si può agire è la massimizzazione delle economie di scala, al fine di ridurre il più possibile il costo unitario degli impianti, compatibilmente con i vincoli territoriali e normativi del Paese. Negli scenari di ICE BAN e NET ZERO, in cui la transizione alla mobilità elettrica è più marcata e il numero di batterie a fine vita è significativamente maggiore, gli investimenti necessari per la realizzazione degli impianti di disassemblaggio si collocano tra 650 e 750 milioni di euro. Al contrario, nello scenario BAU, in cui la diffusione dei veicoli elettrici è più lenta, il fabbisogno di infrastrutture è minore e i costi risultano inferiori, attestandosi intorno ai 400 milioni di euro. I costi variabili del processo incidono mediamente per il 20% del totale e aumentano proporzionalmente alla quantità di kWh da gestire, essendo direttamente legati al numero di batterie da estrarre dai veicoli. Come si evince dai risultati dell'ottimizzazione lineare, la costruzione degli impianti privilegia strutture di media e grande dimensione, senza che emergano soluzioni che favoriscano impianti di piccola taglia. Anche con un α pari a 0.7, le scelte ottimali puntano sulla realizzazione di impianti più grandi, coerentemente con la necessità di contenere i costi attraverso le economie di scala. Questo conferma che, a differenza degli impianti di riciclo, dove è possibile valutare diverse strategie in funzione di parametri economici, ambientali o politici, nel caso del disassemblaggio le decisioni sono rigidamente determinate dal volume di batterie da trattare e dall'esigenza di avere un'infrastruttura adeguata a supportare la transizione. Un aspetto cruciale riguarda la necessità di sviluppare impianti specializzati per il disassemblaggio delle batterie. Attualmente, infatti, le infrastrutture esistenti sono state concepite per la gestione dei veicoli con motore a combustione interna e non sono attrezzate per smantellare le componenti ad alta tensione dei veicoli elettrici in modo sicuro ed efficiente. Questo implica che, oltre a dover potenziare la capacità complessiva di disassemblaggio, è necessario investire nella costruzione o nell'adeguamento di impianti specializzati, con personale formato e processi adeguati alla gestione delle batterie ad alta capacità. Nel pianificare la costruzione di questi impianti, è necessario tenere conto del fenomeno NIMBY (Not In My Back Yard), ovvero l'opposizione delle comunità locali alla realizzazione di infrastrutture industriali percepite come problematiche per il territorio. Nel caso

degli impianti di disassemblaggio, l'urgenza di garantire un'infrastruttura adeguata rende inevitabile la realizzazione di strutture di grandi dimensioni, anche a costo di dover affrontare eventuali resistenze locali. In questa fase, la priorità è massimizzare l'efficienza economica e operativa, non diversificare geograficamente le strutture per ragioni di accettabilità territoriale. Per questo motivo, eventuali sforzi per superare le resistenze locali devono essere concentrati sugli impianti di disassemblaggio, mentre negli impianti di riciclo, che offrono maggiore flessibilità causa la variazione di più parametri considerati come l'export e la percentuale di riciclo diretto rispetto al riutilizzo che possono influire molto sui costi, è possibile adottare strategie più adattabili a fattori ambientali e sociali. Un ritardo negli investimenti nel disassemblaggio avrebbe conseguenze critiche per l'intero sistema di gestione delle batterie a fine vita. In primo luogo, la mancanza di impianti adeguati bloccherebbe il flusso di batterie, causando un accumulo di veicoli in attesa di essere smantellati. Questo comporterebbe un incremento significativo dei costi di magazzino, poiché le vetture dovrebbero essere stoccate fino a quando non saranno disponibili capacità sufficienti per il disassemblaggio. Senza impianti di disassemblaggio adeguati, non solo non sarebbe possibile riciclare le batterie, ma nemmeno esportarle. Di conseguenza, l'intero sistema potrebbe entrare in una fase di stallo operativo, con batterie inutilizzabili che occupano spazio senza poter essere processate. A livello normativo, il Regolamento UE 2023/1542 (European Parliament and Council of the European Union (2023)) ha stabilito quote obbligatorie di recupero dei materiali dalle batterie a fine vita, che devono essere rispettate dagli Stati membri per evitare sanzioni. Il mancato raggiungimento di questi obiettivi potrebbe comportare sanzioni economiche o limitazioni nella produzione e commercializzazione di nuove batterie nel mercato europeo. Se non si riesce a tenere il passo con questo primo processo, ovvero con l'estrazione delle batterie dalle autovetture, non sarà facile rispettare la normativa riguardo al riciclo, che è una fase ad essa successiva. Inoltre, una gestione inefficiente del disassemblaggio costringerebbe il Paese a dipendere interamente dall'importazione di materiali critici per rispettare le quote di riciclo, aumentando la dipendenza da fornitori esteri e rendendo il sistema vulnerabile a crisi di approvvigionamento. Considerando la recente crisi dei semiconduttori, che ha dimostrato le difficoltà legate alla dipendenza da forniture esterne, la creazione di una filiera nazionale per il disassemblaggio e il recupero delle materie prime appare strategicamente necessaria per evitare condizioni di svantaggio competitivo rispetto agli altri Paesi europei. Il disassemblaggio è quindi un prerequisito indispensabile per ogni strategia futura di gestione delle batterie, sia essa il riciclo interno, l'export o la seconda vita. Senza impianti adeguati, l'intero sistema di trattamento delle batterie risulterebbe inefficiente e si creerebbe un collo di bottiglia strutturale che limiterebbe la capacità del Paese di rispettare le normative europee e di rimanere competitivo nella transizione verso la mobilità elettrica. Gli investimenti in questa fase sono quindi non procrastinabili e devono essere considerati come il primo tassello per costruire un sistema di gestione sostenibile delle batterie a fine vita.

5.3 Riciclo: scenari equilibrati

Gli scenari di tipo 1, indipendentemente dal contesto in cui si collocano (BAU, ICE BAN o NET ZERO), condividono le stesse ipotesi di base: una quota di export del 40%, un rapporto 50%-50% tra riciclo diretto e riutilizzo in seconda vita e un gap limite medio per gli investimenti. Questo tipo di strategia appare come una scelta di compromesso, pensata per non esporsi eccessivamente a decisioni estreme. Può risultare vantaggiosa in situazioni di incertezza normativa e di mercato, dove non è ancora del tutto chiaro quali saranno le evoluzioni legislative future o le condizioni economiche che guideranno il settore. Questa strategia può essere considerata da un lato conservativa, in quanto evita investimenti eccessivi in aumento di capacità, ma allo stesso tempo riconosce il rischio di rimanere troppo indietro rispetto ad altri Paesi, con la conseguente perdita di autonomia nel settore. Nei risultati esposti nel capitolo precedente, si può notare come gli scenari di tipo 1 presentino valori sempre intermedi tra quelli degli scenari 2 e 3, sia in termini di capacità impiantistica che di investimenti. Questo porta a identificare questa strategia come una **strategia equilibrata**, che tenta di minimizzare i rischi mantenendo una certa flessibilità per adattarsi agli sviluppi futuri. Uno degli elementi chiave di questa strategia è la consapevolezza che l'Unione Europea potrebbe imporre quote di riciclo sempre più stringenti, in particolare imponendo l'obbligo di produrre nuovi pacchi batteria con una percentuale minima di materie prime critiche riciclate. Nonostante ciò, si sceglie comunque di agire con cautela, evitando di espandere eccessivamente la capacità impiantistica finché non vi è una maggiore certezza sulle normative e sulle sanzioni future. Questo approccio è giustificato dal fatto che i dibattiti tra gli stati membri e la Commissione Europea sono ancora in corso e non permettono di avere un quadro chiaro della direzione normativa definitiva. Il mantenere una quota di export del 40% consente di non puntare eccessivamente sulla capacità di riciclo interna, riducendo il peso degli investimenti necessari. Questa scelta implica comunque la necessità di investire per aumentare la capacità impiantistica, al fine di evitare di rimanere completamente dipendenti dalle esportazioni e trovarsi in condizioni di svantaggio geopolitico rispetto ad altri Paesi. Per questo motivo, diventa cruciale mantenere buone relazioni commerciali con l'estero, affinché vi sia una domanda stabile per l'acquisto delle batterie a fine vita. La vendita delle batterie potrebbe infatti rappresentare una soluzione tampone nel caso in cui il Paese non riuscisse ad adattare rapidamente la propria capacità produttiva alle richieste del mercato. Questa strategia è quindi mirata a ridurre i rischi e a lasciare aperte più opzioni, senza esporre il Paese a investimenti eccessivi che potrebbero rivelarsi non necessari. L'approccio consente di mantenere una relativa autosufficienza, ma senza rinunciare all'integrazione con i mercati esteri per compensare eventuali mancanze di capacità interna. Un altro aspetto da considerare è l'importanza attribuita alla seconda vita delle batterie, che permette di ritardare il riciclo quando necessario e ridurre la necessità di produrre nuove batterie dedicate agli usi stazionari. Sebbene questa strategia garantisca una certa flessibilità, essa non consente di eccellere in alcun settore, né di assumere una posizione di leadership nel mercato del riciclo delle batterie. In termini di innovazione, chi adotta questo approccio potrebbe essere definito come parte della **maggioranza anticipatrice** (Schilling (2020)), ovvero quella categoria

di investitori che, pur adottando nuove tecnologie prima della media del mercato, lo fa con un approccio prudente, senza assumere il ruolo di pionieri. Normalmente, questi attori non esercitano un'influenza diretta sul settore, ma si avvalgono di numerose relazioni commerciali per restare competitivi, senza però avere un forte potere contrattuale. Questo comporta il vantaggio di ridurre i rischi iniziali, ma allo stesso tempo costringe a dipendere dagli innovatori del settore, i quali potrebbero acquisire maggiore potere strategico e contrattuale nel tempo. Dal punto di vista dell'applicabilità, questa strategia è più adatta per uno scenario BAU, in cui l'assenza di normative troppo stringenti sulle quote obbligatorie di riciclo consente di limitare i rischi negli investimenti, mantenendo una discreta indipendenza nelle decisioni future. In un contesto NET ZERO, la strategia può risultare leggermente più sfidante, poiché gli obiettivi europei di sostenibilità premono fortemente sulla necessità di aumentare la capacità di riciclo, ma comunque attuabile grazie alla propria versatilità. In questo caso, il rischio potrebbe essere quello di essere troppo dipendenti dalle importazioni di materie prime o di subire sanzioni per il mancato rispetto delle quote di recupero dei materiali critici. Tuttavia, essendo una strategia equilibrata, è possibile che un Paese riesca a gestire questa situazione senza troppi svantaggi. Nello scenario ICE BAN, invece, questa strategia risulterebbe effettivamente più rischiosa. In questo caso, la necessità di raggiungere rapidamente una capacità di riciclo adeguata è cruciale per soddisfare i requisiti normativi e garantire l'autosufficienza del Paese. Se si optasse per questa strategia in un contesto ICE BAN, si potrebbe rimanere indietro nella capacità di riciclo, con la conseguenza di dover dipendere eccessivamente dall'importazione di materiali critici o dall'export forzato delle batterie esauste. Inoltre, il rischio di subire sanzioni europee diventerebbe concreto, in quanto l'Unione Europea sta progressivamente inasprendo le normative sul recupero di materiali critici, come stabilito dal Regolamento UE 2023/1542 (European Parliament and Council of the European Union (2023)), che prevede quote minime obbligatorie di recupero. Se la capacità di riciclo interna non fosse sufficiente a rispettare queste quote, il Paese rischierebbe limitazioni nella produzione di nuove batterie e sanzioni economiche. Inoltre, un'infrastruttura di riciclo inadeguata potrebbe generare colli di bottiglia nel trattamento delle batterie, con conseguenze sulla disponibilità di materiali critici e sulla competitività del Paese nel settore della mobilità elettrica. In definitiva, la strategia degli scenari di tipo 1 appare particolarmente adatta per scenari BAU e NET ZERO, ma potrebbe rivelarsi troppo cauta in un contesto ICE BAN, dove una maggiore rapidità di adattamento è necessaria per rispettare le normative europee e l'ingente aumento del numero di batterie da trattare. La scelta di adottare questa strategia dipende quindi dall'incertezza normativa e di mercato: se le condizioni rimanessero vaghe o soggette a modifiche nel tempo, questa strategia potrebbe rappresentare un buon compromesso, ma in uno scenario con regolamenti stringenti e stabiliti con certezza sin dal breve termine, potrebbe risultare inadeguata per garantire un'indipendenza strategica a lungo termine.

5.4 Riciclo: scenari conservativi

Gli scenari di tipo 2, indipendentemente dal contesto in cui si trovano (BAU, ICE BAN o NET ZERO), condividono una serie di ipotesi comuni: una quota di export dell'80%, una percentuale di riciclo diretto del 20% rispetto al riutilizzo in seconda vita e un gap limite alto per la reattività agli investimenti. In questo caso, il Paese sceglie deliberatamente di affidarsi prevalentemente all'estero per la gestione delle batterie a fine vita, riducendo al minimo la capacità di riciclo interna e privilegiando il riutilizzo in applicazioni stazionarie. Questa strategia punta a ridurre al minimo gli investimenti, rinunciando a sviluppare un'infrastruttura di riciclo avanzata e ridimensionando il ruolo del Paese nel mercato del trattamento delle batterie. I dati della simulazione evidenziano come, negli scenari di tipo 2, gli investimenti e la capacità di trattamento locale siano nettamente inferiori rispetto agli scenari 1 e 3. Questo porta a definire tale approccio come **prevalentemente conservativo**, orientato a limitare i rischi economici e a mantenere la capacità massima di riciclo simile a quella attuale, senza intraprendere progetti potenzialmente onerosi e senza assumersi il rischio di investimenti futuri che potrebbero non rivelarsi vantaggiosi per il Paese. In termini di innovazione, chi adotta questo approccio può essere considerato come un **late entrant**, ovvero un attore che ritarda l'adozione delle nuove tecnologie fino a quando non vi è una chiara evidenza della loro utilità e redditività. Gli investimenti vengono quindi effettuati solo quando il settore ha già raggiunto una maturità consolidata e le incertezze iniziali sono state risolte da altri. Secondo la letteratura sulle strategie di innovazione, i late entrants tendono a non essere opinion leader e ad avere un atteggiamento scettico verso i cambiamenti, basando le proprie decisioni sulle esperienze passate più che sulle tendenze future (Schilling (2020)). L'idea alla base di questa strategia è quella di eliminare i rischi legati agli investimenti e di non vincolarsi alla creazione di una nuova infrastruttura nazionale per il riciclo delle batterie. Nel caso in cui le normative europee dovessero diventare più stringenti, si punta a far fronte agli obblighi ricorrendo semplicemente all'outsourcing del trattamento delle batterie all'estero, contando sulla possibilità di rivendere i pacchi batteria esausti e sulla capacità di assorbire il surplus di batterie nel mercato della seconda vita per usi stazionari. Questa visione si basa sull'idea che, finché le normative non impongano restrizioni particolarmente rigide, il Paese possa evitare di investire nel riciclo e limitarsi a gestire il flusso di batterie tramite il commercio internazionale. Questa strategia però presenta diversi rischi evidenti. Il primo e più immediato è la totale dipendenza dall'estero, un fattore estremamente critico considerando le recenti tensioni geopolitiche e le crisi delle catene di approvvigionamento. Il mercato delle batterie è strategicamente cruciale per la transizione energetica globale e affidarsi completamente ai fornitori esteri per la gestione delle batterie a fine vita potrebbe lasciare il Paese in una condizione di vulnerabilità economica e politica. Gli ultimi anni hanno dimostrato come le crisi globali possano rapidamente alterare gli equilibri commerciali: le guerre in Europa, la crisi energetica e le tensioni tra i principali blocchi economici hanno reso evidente la necessità di rafforzare l'indipendenza strategica nel settore delle materie prime critiche. Un altro rischio importante è legato alle normative europee che, negli anni a venire, imporranno quote minime di riciclo per i materiali critici delle batterie. Il Rego-

lamento UE 2023/1542 (European Parliament and Council of the European Union (2023)) stabilisce normative potenzialmente stringenti per le quote di riciclo. Questo significa che, per rispettare gli obblighi, il Paese dovrà acquistare materiali riciclati dall'estero, esponendosi a fluttuazioni di prezzo e alla possibile scarsità di forniture. Una gestione completamente esternalizzata del riciclo potrebbe quindi rendere il settore più vulnerabile a variazioni dei costi di approvvigionamento, aumentando il prezzo finale delle batterie prodotte nel Paese e riducendone la competitività. Un'ulteriore criticità è legata al contesto etico e ambientale. L'Unione Europea ha posto l'accento sulla necessità di ridurre la dipendenza dai Paesi che hanno il monopolio sull'estrazione dei materiali critici, spesso caratterizzati da condizioni di lavoro precarie e sfruttamento delle risorse naturali. Non investire nel riciclo a livello nazionale significa continuare a dipendere da questi Paesi per l'approvvigionamento delle materie prime, andando in direzione opposta rispetto agli obiettivi di sostenibilità europei. Inoltre, la gestione del fine vita delle batterie è destinata a diventare un tema sempre più centrale nelle politiche ambientali: adottare una strategia basata sull'outsourcing potrebbe quindi generare un conflitto con le normative europee, con il rischio di future restrizioni o penalizzazioni economiche. Dal punto di vista strategico, una scelta di questo tipo potrebbe anche rappresentare una forma di protesta contro imposizioni normative ritenute troppo restrittive, come quelle dell'ICE BAN. Tuttavia, per quanto possa essere una strategia utile per evitare investimenti eccessivi, si tratta di una scelta anche rischiosa. Se l'obiettivo è contenere i costi, sarebbe preferibile adottare gli approcci dello scenario 1, che offrono un maggiore equilibrio tra investimenti, esportazioni e capacità produttiva interna, riducendo la dipendenza dall'estero senza imporsi oneri eccessivi. La strategia conservativa potrebbe avere una sua applicabilità limitata esclusivamente in un contesto BAU. L'assenza di normative stringenti in questo scenario permetterebbe al Paese di non essere immediatamente penalizzato dalla mancanza di investimenti nel riciclo, e la minore pressione sulla transizione energetica potrebbe evitare di subire un'eccessiva esposizione agli effetti negativi dell'outsourcing. Ciò nonostante, negli scenari NET ZERO e soprattutto ICE BAN, questa strategia risulterebbe eccessivamente arretrata e poco lungimirante. In un mondo in cui il riciclo e la gestione sostenibile delle batterie stanno diventando un pilastro della transizione energetica, scegliere di rimanere indietro nello sviluppo della capacità nazionale di trattamento potrebbe risultare estremamente svantaggioso. Adottare questa strategia negli scenari più ambiziosi della transizione energetica significherebbe essere superati da chiunque abbia un minimo vantaggio competitivo nel settore del riciclo, con un inevitabile impatto sulle relazioni commerciali e sul potere contrattuale del Paese. Senza una propria infrastruttura, si diventerebbe completamente dipendenti da chi possiede impianti avanzati di riciclo, lasciando il controllo delle materie prime critiche nelle mani di altri. Se la domanda di materiali riciclati aumentasse notevolmente, come prevedibile, i Paesi che detengono la leadership nel riciclo potrebbero monopolizzare il mercato, imponendo prezzi elevati e condizioni sfavorevoli ai Paesi meno attrezzati. Lo scenario 2 rappresenta una scelta estremamente prudente e difensiva, utile solo in un contesto di bassa pressione normativa come BAU, ma potenzialmente inadatta in scenari come NET ZERO e ICE BAN. L'incertezza sulle normative future potrebbe far sembrare vantaggioso questo approccio nel breve termine, ma nel lungo

periodo la mancanza di investimenti nel settore del riciclo potrebbe trasformarsi in una debolezza economica e strategica.

5.5 Riciclo: scenari pionieristici

Gli scenari di tipo 3 rappresentano un approccio strategico estremamente ambizioso e aggressivo, caratterizzato da un tasso di esportazione nullo, un rapporto riciclo-riutilizzo dell'80%-20% e un'elevata reattività agli investimenti, con un gap limite molto basso. Questo tipo di strategia mira a trattare internamente tutte le batterie a fine vita, evitando qualsiasi dipendenza dall'estero e cercando di costruire una posizione di leadership nel settore del riciclo. Tale strategia può essere definita **pionieristica**, in quanto punta a posizionare il Paese tra i primi attori nel settore del trattamento delle batterie esauste, cercando di ottenere un vantaggio competitivo duraturo. Secondo la letteratura sull'innovazione, i **pionieri** sono coloro che investono in nuovi settori emergenti con largo anticipo rispetto al resto del mercato. Essi sono generalmente caratterizzati da una propensione al rischio più elevata, sono disposti ad affrontare incertezze e complessità e giocano un ruolo fondamentale nella diffusione dell'innovazione, influenzando i modelli industriali e il comportamento degli altri attori del mercato (Schilling (2020)). Una strategia simile è senza dubbio la più coraggiosa tra le tre ipotizzate, poiché implica grandi investimenti iniziali e un'attesa prima di poter raccogliere i benefici derivanti dall'avere una posizione di primo piano nel mercato del riciclo. In tutti e tre gli scenari (BAU, ICE BAN, NET ZERO), questa strategia avrebbe il vantaggio di garantire un forte potere contrattuale verso l'estero e permettere al Paese di mantenersi allineato con le normative europee, evitando il rischio di sanzioni. Uno scenario con esportazione nulla può essere considerato un'ipotesi estrema, ma serve a rappresentare la volontà di raggiungere l'autosufficienza nel settore e di posizionarsi come un punto di riferimento europeo per il riciclo delle batterie. Dal punto di vista economico e finanziario, lo scenario 3 è senza dubbio il più rischioso. Gli investimenti richiesti nel breve termine sono elevati, con la speranza che nel lungo periodo possano generare un ritorno adeguato sotto forma di maggiore indipendenza strategica e leadership di mercato. Per un Paese come l'Italia, questa strategia potrebbe essere complessa da attuare, in quanto richiede grandi disponibilità finanziarie e una forte volontà da parte di investitori e imprese private di scommettere su un settore che, sebbene promettente, è ancora in fase di sviluppo. Comunque sia, se adottata correttamente, questa strategia potrebbe rappresentare un'opportunità unica per entrare da protagonista in un settore in crescita e contribuire attivamente alla sua definizione, garantendosi una posizione di rilievo in Europa. Uno dei principali vantaggi di questa strategia è la capacità di garantire una piena autonomia nella gestione delle batterie a fine vita, evitando di dipendere dalle infrastrutture estere per il trattamento e il riciclo. Inoltre, il Paese avrebbe accesso diretto ai materiali critici riciclati, riducendo la necessità di importare litio, cobalto, nichel e rame e mitigando l'esposizione ai rischi geopolitici e alle fluttuazioni dei prezzi di mercato. Questa strategia consentirebbe anche di evitare il ricorso a Paesi con condizioni di lavoro precarie e ambienti di estrazione poco regolamentati, contribuendo a rendere il settore delle batterie più

etico e sostenibile. D'altra parte, gli aspetti negativi e i rischi associati a questa scelta non sono trascurabili. Se nei prossimi anni le normative europee non diventassero così stringenti come previsto, o se emergessero soluzioni alternative che riducono la necessità di riciclo su larga scala, si potrebbe incorrere in una sovra capacità produttiva, con impianti di riciclo sottoutilizzati e ingenti risorse economiche già investite, senza possibilità di un ritorno adeguato. Questo potrebbe pesare sulle finanze dello stato, generando inefficienze e problemi di gestione delle risorse industriali. In ogni caso, considerando l'andamento delle ultime decisioni prese in sede europea, questa ipotesi appare poco probabile, poiché la direzione normativa sembra essere sempre più orientata verso un modello circolare per il settore delle batterie. Dal punto di vista della scelta strategica, lo scenario 3 risulta eccessivamente ambizioso e rischioso in un contesto BAU, dove non vi sono normative stringenti che impongano di dover attuare il riciclo su larga scala. In questo caso, già una strategia di tipo 1 potrebbe essere sufficiente per mantenere una certa autonomia e dire la propria nel mercato, senza necessità di esporsi a rischi elevati. Tuttavia, questo scenario potrebbe avere senso anche in BAU nel caso in cui il Paese decidesse di investire fortemente in questo settore per creare un mercato redditizio indipendentemente dal contesto normativo. In altre parole, se l'obiettivo fosse sviluppare un vantaggio competitivo a lungo termine, questo approccio potrebbe comunque rivelarsi vincente, pur non essendo obbligato da normative stringenti. Negli scenari ICE BAN e NET ZERO, invece, questa strategia risulterebbe molto più coerente e meno rischiosa, in quanto garantirebbe il rispetto delle normative europee, evitando sanzioni e consentendo una maggiore indipendenza dai mercati esteri. In questi scenari, infatti, la gestione interna delle batterie diventerà un requisito fondamentale per evitare penalizzazioni economiche e politiche. L'Unione Europea, attraverso il Regolamento 2023/1542 (European Parliament and Council of the European Union (2023)), ha già stabilito quote minime obbligatorie di recupero per i materiali critici utilizzati nelle nuove batterie. Garantire un sistema di riciclo interno adeguato significa poter rispettare questi obiettivi senza dover dipendere da fornitori esteri di materiali riciclati, evitando fluttuazioni dei prezzi e vulnerabilità geopolitiche. Inoltre, il monopolio di alcuni Paesi sulle materie prime critiche sta già spingendo l'UE a incentivare la creazione di filiere europee indipendenti, e chi si posizionerà prima in questo settore potrà godere di un notevole vantaggio competitivo nel lungo termine. Lo scenario 3 è quello con il maggiore potenziale strategico e il più alto livello di rischio e la sua applicabilità dipende molto dal contesto normativo e dalla visione politica del Paese. Se si punta a costruire un settore forte e indipendente, questa strategia può garantire un enorme vantaggio competitivo a lungo termine, ma richiede investimenti elevati e un'elevata fiducia nella transizione energetica e nell'adozione del modello circolare. Se, invece, si preferisce un approccio più prudente, potrebbe risultare eccessivamente rischioso, soprattutto in scenari BAU, dove l'urgenza del riciclo non è ancora dominante. In ogni caso, adottare questa strategia significherebbe scommettere sulla leadership europea nel settore del riciclo delle batterie, con l'opportunità di plasmare il mercato futuro e influenzarne le dinamiche economiche e politiche.

5.6 Scenario europeo più probabile e conseguente strategia

Analizzando gli scenari BAU, ICE BAN e NET ZERO, è fondamentale valutare quale sia il più realistico nel futuro per l'Europa e di conseguenza per l'Italia, considerando le attuali politiche europee e nazionali, nonché le tendenze di mercato.

- **scenario ICE BAN**: questo scenario prevede il divieto di vendita di veicoli a combustione interna entro il 2035, in linea con le direttive dell'Unione Europea. Ciò nonostante, recenti sviluppi indicano una crescente opposizione a tale misura. Ad esempio, l'Italia ha richiesto una revisione anticipata del divieto, proponendo di includere tecnologie alternative come i biocarburanti. Anche la Germania desidererebbe una revisione della normativa, ma vorrebbe comunque l'ICE BAN al 2035. Ciò suggerisce che lo scenario dell'ICE BAN totale sia ancora oggi soggetto a controversie e possa essere ridiscusso molto nel corso dei prossimi anni (tali informazioni sono di dominio pubblico e si può avere accesso ad esse tramite quotidiani o una semplice ricerca sul web).
- **scenario BAU**: lo scenario prevede che tutto rimanga pressoché inalterato senza avanzare normative troppo stringenti e, seppure l'Italia e altri stati stiano cercando di premere per un intervento comunitario non troppo estremo, è difficile che l'andazzo rimanga il medesimo attuale nei prossimi anni ed è probabile che comunque delle imposizioni ci saranno, più o meno rigide, data l'importanza data negli ultimi anni alla transizione energetica, alla lotta per la decarbonizzazione e al Green Deal;
- **Scenario NET ZERO**: lo scenario NET ZERO appare in definitiva il più equilibrato e potenzialmente il più probabile dei tre. Tiene conto del fatto che le cose cambieranno rispetto allo scenario attuale e che si premerà per ottenere zero emissioni al 2050 e questo probabilmente per forza di cose abbasserà perlomeno l'acquisto delle auto a combustione interna da qui alla fine dell'orizzonte temporale della simulazione, senza però dare per scontato che davvero sarà vietata completamente la loro vendita dopo il 2035 come nello scenario ICE BAN.

Tenendo conto del fatto che l'alternativa NET ZERO sembra essere la più realistica e probabile, considerando la grande incertezza presente attualmente e le divergenze sull'ICE BAN e ipotizzando che si vogliano effettuare comunque grandi cambiamenti rispetto al BAU, è possibile determinare quale potrebbe essere il range di investimenti necessari più probabile, considerando i quarant'anni di simulazione, secondo i risultati trovati tramite la simulazione ed il modello di ottimizzazione lineare. Considerando gli scenari 1, 2 e 3, che dipendono dalle scelte strategiche che vuole effettuare il Paese e che sono state analizzate sopra in base allo scenario, emergono i seguenti risultati, che tengono in considerazione come base di trovarsi nello scenario NET ZERO:

- costo stimato per gli investimenti in disassemglaggio: 657,916,875 euro (tabella 18)
- costo stimato totale (investimenti e costi variabili) per il disassemblaggio: 817,190,191 euro (tabella 18);
- costo minimo per gli investimenti in riciclaggio stimato: 32,725,000 euro, seguendo la strategia dello scenario 2; (tabella 20);
- costo minimo totale (investimenti e costi variabili) in riciclaggio stimato: 86,301,327 euro, sempre seguendo la strategia dello scenario 2 (tabella 20);
- costo massimo per gli investimenti in riciclaggio ipotizzati: 523,600,000 euro, seguendo la strategia dello scenario di investimento 3 (tabella 20);
- costo massimo totale (investimenti e costi variabili) in riciclaggio stimato: 1,423,923,347 euro, seguendo la strategia dello scenario di investimento 3 (tabella 20).

Si può osservare che i costi variano molto tra minimo e massimo per quanto riguarda il riciclaggio, in quanto gli scenari considerati, analizzati come nei paragrafi precedenti, presuppongono scelte strategiche molto differenti tra di loro ed è interessante notare come le stesse possano incidere enormemente sulle finanze del Paese. Un fattore principale e preponderante infatti per prendere una decisione tra scenario decisionale 1, 2 o 3 nel riciclo è che non è solo da considerare come una scelta strategica ma anche legata alla disponibilità economica a disposizione e alla possibilità di dedicarla al settore senza trascurare problemi potenzialmente più rilevanti. Un Paese come l'Italia infatti non è detto che riesca ad ottenere abbastanza fondi per investire così ingentemente in impianti di riciclo e disassemblaggio per attuare la strategia 3 (pionieristica) e può essere forzato ad adottarne un'altra anche semplicemente per necessità. Considerando gli ingenti costi emersi e alla luce delle valutazioni fatte durante la valutazione degli scenari, si potrebbe ipotizzare di effettuare investimenti come nella strategia equilibrata, la numero 1, che porterebbe a costi di investimento per il riciclo di 144,375,000 euro e costi totali (variabili e di investimento) sempre per il riciclo di 391,454,866 euro. Nella strategia 3 infatti, quella corrispondente ai costi massimi, i costi variabili incidono troppo sul totale portando ad una spesa complessiva per il riciclo di oltre un miliardo di euro. I costi variabili degli impianti di riciclo sono più alti dei costi variabili legati agli impianti di disassemblaggio, effettuando le conversioni citate nel capitolo della metodologia e basandosi sui dati di Rosenberg et al. (2023). Si può notare esplicitamente nelle tabelle 18 e 20. I costi operativi per il riciclo delle batterie sono più alti per diverse ragioni legate alla complessità dei processi, alle tecnologie richieste e alla gestione delle sostanze pericolose. Il disassemblaggio è un processo prevalentemente meccanico e manuale con un numero limitato di passaggi e consiste nello smontaggio dei pacchi batteria a livello di modulo o cella. Questo processo può includere lo scaricamento elettrico per motivi di sicurezza, ma non implica alcuna trasformazione chimica o metallurgica. Non implica reazioni chimiche o processi ad alta temperatura ed è una fase meno complessa; richiede attrezzature specializzate ma è

prevalentemente manuale o semi-automatizzato, il che comporta costi relativamente contenuti. Il riciclo delle batterie è un processo molto più complesso e costoso. Le batterie agli ioni di litio contengono materiali preziosi ma anche sostanze chimiche pericolose che devono essere trattate con la massima attenzione per evitare danni ambientali o alla salute umana. I processi di riciclo includono operazioni complesse come la separazione e purificazione dei metalli attraverso tecnologie avanzate come la pirometallurgia o l'idrometallurgia, che richiedono impianti ad alta tecnologia e alte temperature, aumentando di fatto i costi operativi (Harper et al. (2019)). I costi di investimento invece appaiono più ingenti cumulativamente per gli impianti di disassemblaggio in quanto essi devono sempre tenere conto di tutte le batterie presenti a prima fine vita, mentre quelle che giungono al riciclo sono inferiori come visto a causa della percentuale di export e della percentuale di riutilizzo rispetto al riciclo diretto. Approcciandosi alla strategia 1 si potrebbe mantenere un approccio equilibrato che consenta di evitare spese eccessivamente alte e di dire comunque la propria nel settore, giovando all'economia e alla posizione del Paese nell'Unione Europea. Per quanto riguarda i costi di disassemblaggio il valore rappresenta il costo che si otterrebbe costruendo tutti gli impianti adibiti a disassemblare le batterie e sicuramente ne saranno necessari moltissimi nel momento in cui potrebbe prendere così tanto piede il loro commercio.

5.7 Limitazioni del lavoro svolto

Sebbene l'analisi condotta abbia fornito un quadro dettagliato sul trattamento delle batterie agli ioni di litio a fine vita e sugli investimenti necessari in Italia da qui al 2050, è opportuno evidenziare alcune limitazioni legate al modello utilizzato, alle assunzioni fatte e alle incertezze del settore. Tali limitazioni possono influenzare la precisione delle previsioni e suggeriscono la necessità di possibili approfondimenti futuri per migliorare la robustezza del modello.

Limitazioni metodologiche e modellistiche Uno dei principali aspetti critici riguarda l'approccio utilizzato per la simulazione del mercato delle batterie. Il modello assume una crescita lineare della domanda di batterie e degli investimenti necessari per il loro trattamento. Nonostante ciò però, la realtà potrebbe seguire un andamento più vicino a una curva logistica, con una fase iniziale di crescita rapida seguita da una stabilizzazione nel lungo periodo, falsando i risultati attuali ottenuti con il modello. Un altro aspetto riguarda i dati di market share utilizzati, che sono stati in parte estrapolati da studi condotti in Svizzera: sebbene essa possa essere un riferimento utile, vi possono essere differenze normative, infrastrutturali e di adozione tecnologica che potrebbero rendere questi dati meno rappresentativi della realtà italiana. Infine, la stima dei costi di investimento si basa su dati attuali, ma non tiene conto di possibili effetti della curva di esperienza. Con il progresso tecnologico e l'adozione di metodi più efficienti, il costo per tonnellata trattata potrebbe diminuire nel tempo, portando a una sovrastima dei costi futuri oppure, viceversa, se nuove normative imponessero requisiti più stringenti o se le materie prime

riciclate avessero una domanda minore rispetto alle previsioni, i costi potrebbero risultare più elevati. Uno degli aspetti critici del modello di ottimizzazione lineare utilizzato invece riguarda la semplificazione nella considerazione dei costi di investimento e operativi. Il modello assume costi uniformi per tonnellata trattata, sia per il disassemblaggio che per il riciclo, ma nella realtà potrebbero esserci differenze significative tra gli impianti in base a fattori come:

- **economie di scala**: impianti più grandi potrebbero beneficiare di una riduzione del costo unitario per tonnellata trattata rispetto a impianti più piccoli;
- **tecnologie impiegate**: il costo del trattamento delle batterie potrebbe variare a seconda dei processi utilizzati (pirometallurgia vs idrometallurgia), ma il modello assume una media generale senza differenziare le tecnologie applicate;
- **costi variabili e fissi**: il modello considera il costo totale degli impianti come una somma diretta dei costi di investimento e operativi, ma nella realtà i costi variabili potrebbero dipendere in modo non lineare dal volume di batterie trattate e quindi non essere determinati in maniera assoluta.

Un'altra limitazione riguarda la possibilità di introdurre vincoli più dettagliati nel modello di ottimizzazione. Attualmente, la formulazione tiene conto di parametri chiave come il gap limite negli investimenti e la capacità richiesta dagli impianti, ma potrebbero essere aggiunti ulteriori vincoli per rappresentare meglio la realtà del settore. Alcuni esempi di possibili miglioramenti potrebbero includere vincoli sulla disponibilità di materie prime critiche, per modellare meglio la dipendenza dal mercato delle materie prime oppure vincoli sulle emissioni ambientali dei processi di riciclo, per considerare l'impatto ambientale di diversi scenari e non solo il loro costo economico.

Limitazioni nelle assunzioni sui veicoli e sulle batterie Osservando limitazioni da un altro punto di vista, si può notare il fatto che l'analisi è stata condotta considerando i veicoli elettrici in generale, senza distinguere tra autovetture private, veicoli commerciali leggeri e flotte aziendali. Queste categorie hanno però cicli di vita diversi e possono avere un impatto differente sulla domanda di riciclo e disassemblaggio: ad esempio, i veicoli commerciali tendono ad avere un turnover degli stessi più rapido, portando a un'accelerazione della domanda di riciclo rispetto alle auto private. Un'altra semplificazione può invece essere riferita alla vita utile delle batterie NMC (Nickel Manganese Cobalt) e LFP (Lithium Iron Phosphate); nel modello si è infatti considerato che entrambe abbiano la stessa durata media, quando in realtà le batterie LFP hanno dimostrato empiricamente di avere una vita utile più lunga. Questa semplificazione potrebbe alterare la tempistica con cui le batterie entrano nel flusso di fine vita, influenzando la distribuzione temporale della domanda di impianti di riciclo e di seconda vita.

Incertezze normative e politiche Le previsioni fatte nel modello si basano sulle attuali normative europee, ma il settore delle batterie potrebbe essere soggetto a continue modifiche. Un cambiamento normativo avrebbe un impatto significativo sulla domanda di impianti di riciclo potendo rendere alcune ipotesi fatte nel modello meno valide. Un altro aspetto riguarda la dipendenza dagli incentivi governativi e dai finanziamenti UE: il modello non considera in modo dettagliato il ruolo di eventuali agevolazioni fiscali o fondi europei che potrebbero abbassare la necessità di investimenti privati diretti e oltretutto la presenza di sussidi e programmi di finanziamento per il riciclo e la transizione energetica potrebbero modificare la sostenibilità economica delle strategie proposte.

Limitazioni nei costi di investimento e nei tempi di realizzazione La stima degli investimenti necessari per il disassemblaggio e il riciclo delle batterie assume che gli impianti possano essere costruiti e resi operativi in tempi standard e prestabiliti. Malgrado ciò, nella realtà, il settore industriale è soggetto a ritardi burocratici, autorizzativi e logistici, che potrebbero posticipare la capacità di riciclo effettiva e generare colli di bottiglia nella gestione delle batterie esauste, inserendo una variabilità di contesto ulteriore nel modello che potrebbe richiedere delle analisi più approfondite. Un'altra criticità riguarda invece la distribuzione geografica degli impianti, infatti il modello analizza gli investimenti a livello nazionale, senza considerare però in modo dettagliato la localizzazione ottimale delle strutture. Una distribuzione non efficiente potrebbe aumentare i costi logistici, riducendo la competitività degli impianti italiani rispetto a quelli esteri e per ovviare a ciò si potrebbe inserire nel modello di ottimizzazione lineare una facility location cercando di reperire i dati sulle posizioni più idonee in cui si potrebbero costruire gli impianti e utilizzando dei criteri di ottimizzazione della rete per posizionarli nel punto giusto in base alle esigenze. Infine, il modello valuta sempre la percentuale di export e porta a poter effettuare molte analisi e trarre molte conclusioni sugli effetti dell'esportazione sul settore delle batterie, ma non valuta invece la possibilità di importare batterie esauste da altri Paesi europei per sfruttare le economie di scala nelle operazioni di riciclo, ad esempio nel caso si abbia ad un certo punto una capacità di riciclo ottenuta con gli investimenti ma per qualsisi motivo non utilizzata oppure si decida di importare semplicemente per il fine stesso di ottenere agevolazioni economiche dovute al trattamento di grandi quantità di merce come ad esempio una maggiore spartizione dei costi fissi e degli ammortamenti dei nuovi impianti, e l'assenza di questa considerazione potrebbe portare a una sottostima del potenziale di crescita del settore adibito in Italia.

Direzioni future e miglioramenti possibili Alla luce delle limitazioni identificate, future analisi ed implementazioni per lo studio direttamente legate alla risoluzione delle problematiche potrebbero includere:

- l'uso di modelli predittivi più avanzati, come simulazioni basate su curve logistiche per una previsione più accurata della crescita del mercato delle

batterie;

- un'analisi più dettagliata delle diverse tipologie di veicoli elettrici, per differenziare il ciclo di vita e la domanda di riciclo per auto private, veicoli commerciali e flotte aziendali;
- una maggiore precisione nella valutazione della durata delle batterie NMC e LFP, per evitare imprecisioni nei flussi di riciclo e seconda vita;
- l'integrazione di scenari normativi più dinamici, che considerino il possibile inasprimento delle politiche europee sul riciclo e l'economia circolare;
- un'analisi più approfondita sulla logistica e sulla distribuzione geografica degli impianti, per ottimizzare i costi operativi e ridurre la dipendenza da strutture estere;
- la considerazione dell'effetto di ipotetiche economie di scala sulla decisione di investire nella creazione di nuovi impianti o sulla decisione di poter addirittura importare batterie nel Paese oltre a volerle semplicemente esportare per alleggerire il carico gravante di gestione di un ingente numero di batterie.

Nonostante la presenza di queste limitazioni, il modello proposto fornisce una base solida per l'analisi della gestione delle batterie a fine vita in Italia, proponendo una valutazione strutturata degli investimenti necessari fino al 2050. Le semplificazioni adottate sono state necessarie semplicemente per rendere il modello funzionale e adattabile a diverse condizioni di mercato e maggiormente fruibile ed interpretabile anche per i lettori, potendo focalizzare la concentrazione sugli obiettivi primari dello studio senza aggiungere complicazioni che avrebbero potuto esulare dal focus del problema e aggiungere variabili in gioco che sarebbero state eccessivamente onerose da trattare e avrebbero potuto rendere il lavoro dispersivo e le conclusioni poco efficaci e prive di nessi causa effetto facilmente riscontrabili. I miglioramenti suggeriti potrebbero però sicuramente rendere le previsioni ancora più precise e utili per la pianificazione industriale e politica del settore, magari andandole ad inserire in studi differenti e maggiormente focalizzati su aspetti diversi.

6 Conclusioni

L'analisi svolta in questa tesi ha permesso di simulare il percorso delle batterie agli ioni di litio dei veicoli elettrici a fine vita, con l'obiettivo di quantificare gli investimenti necessari per il disassemblaggio e il riciclo nel mercato italiano. Grazie all'approccio della System Dynamics, implementato su AnyLogic, e all'integrazione con un modello di ottimizzazione lineare su Excel, è stato possibile valutare la domanda di nuovi impianti e le relative esigenze di investimento fino al 2050, considerando diversi scenari di sviluppo ed i risultati confermano che la gestione della fine vita delle batterie rappresenterà una sfida centrale nei prossimi anni, sia per l'industria automobilistica che per le politiche di economia circolare. Con il progressivo aumento della quota di veicoli elettrici, il numero di batterie a fine vita crescerà inevitabilmente, anche se con tempistiche diverse a seconda dello scenario analizzato. In tutti i casi, infatti, le capacità attuali di disassemblaggio e riciclo risultano insufficienti a sostenere la domanda futura, rendendo necessari investimenti mirati per evitare colli di bottiglia nel sistema. Dai confronti tra gli scenari emerge che il più realistico è quello Net Zero, ed in esso la richiesta di impianti di riciclo cresce costantemente, con un picco di necessità tra il 2040 e il 2050. Lo scenario ICE BAN, che prevede la cessazione della vendita di auto a combustione interna nel 2035, accelera ulteriormente la pressione sulle infrastrutture, con una domanda di trattamento ancora più elevata in tempi più rapidi. Lo scenario BAU, invece, presenta una crescita più graduale, ma appare meno probabile, dato l'attuale quadro normativo europeo e le politiche ambientali che stanno prendendo forma a livello continentale.

Un elemento chiave emerso dalle simulazioni è il bilanciamento tra riciclo immediato e seconda vita. L'impiego delle batterie in applicazioni stazionarie permette di posticiparne il riciclo, riducendo temporaneamente la pressione sugli impianti, anche se la crescente domanda di materiali critici come litio, nichel e cobalto, unita agli obblighi imposti dal Regolamento UE 2023/1542 (European Parliament and Council of the European Union (2023)) sulle percentuali minime di materiali riciclati nelle nuove batterie suggerisce che, nel lungo termine, sarà comunque necessario potenziare la capacità di riciclo, indipendentemente dall'adozione di strategie di riutilizzo. Un altro fattore rilevante riguarda il ruolo delle esportazioni nella gestione del fine vita delle batterie: esportarne una quota significativa può ridurre la necessità di investimenti in impianti di trattamento a livello nazionale, ma al tempo stesso rendere il Paese dipendente dalle capacità di riciclo estere, con potenziali rischi a livello strategico. Viceversa, puntare sul riciclo locale può garantire un maggiore controllo sull'approvvigionamento di materie prime critiche, riducendo l'esposizione alle fluttuazioni dei mercati internazionali e creando opportunità per il settore. Dal punto di vista finanziario, invece, il modello di ottimizzazione creato ed applicato ha permesso di stimare gli investimenti necessari per colmare il divario tra capacità attuale e futura domanda di trattamento. Gli scenari più aggressivi, con una bassa percentuale di esportazione e un'alta quota di riciclo immediato, comportano un investimento più elevato nel breve termine, ma garantiscono una maggiore stabilità nel lungo periodo; al contrario, gli scenari più conservativi, che prevedono un maggiore

riutilizzo o una quota più alta di batterie esportate, permettono di posticipare parte degli investimenti iniziali, ma potrebbero creare difficoltà future quando le batterie, giunte a fine seconda vita, dovranno comunque essere trattate. Questi risultati evidenziano la necessità di una pianificazione strategica che coinvolga sia il settore pubblico che quello privato: è fondamentale che le istituzioni mettano in campo misure di supporto, come finanziamenti, incentivi fiscali o normative che favoriscano l'ingresso in questo mercato di investitori che vogliano mettersi in gioco per diventare pionieri e protagonisti di questo nuovo settore emergente e allo stesso tempo, una maggiore collaborazione tra costruttori automobilistici, aziende di riciclo e autorità regolatorie potrebbe favorire la creazione di un ecosistema più integrato e capace di gestire in modo più efficace ed efficiente il flusso crescente di batterie a fine vita.

La presente tesi può anche aprire le porte a sviluppi futuri, che potrebbero essere implementati tenendola come punto di partenza, i quali non sono stati esplicitamente trattati in questa analisi e che integrano o si aggiungono alle implementazioni mirate esplicitamente ad eliminare alcune limitazioni del modello che sono state ipotizzate appositamente nel capitolo della discussione. Un primo sviluppo possibile può riguardare l'integrazione di variabili economiche dinamiche, come l'evoluzione dei costi associati a disassemblaggio e riciclo, che attualmente vengono ipotizzati come statici. La loro variazione nel tempo, influenzata da fattori di mercato globali e dalle politiche di regolamentazione europea, potrebbe avere un impatto significativo sulle strategie di investimento e sulla convenienza del riciclo rispetto ad altre opzioni di gestione del fine vita delle batterie. Un ulteriore miglioramento potrebbe derivare dall'inclusione di modelli più dettagliati sulla seconda vita delle batterie, considerando diversi tipi di applicazioni stazionarie e la loro durata effettiva nel tempo. Attualmente, il modello assume una percentuale fissa di batterie destinate a utilizzi secondari, ma un'analisi più approfondita del loro degrado e delle condizioni operative nelle diverse applicazioni permetterebbe di simulare con maggiore accuratezza il reale flusso di batterie che torneranno al riciclo dopo la seconda vita e quando lo faranno esattamente. Una possibile espansione della ricerca potrebbe riguardare anche l'integrazione di fattori normativi ed economici legati agli incentivi pubblici e ai meccanismi di finanziamento per il riciclo delle batterie. La simulazione di scenari con diverse politiche di supporto potrebbe fornire indicazioni utili per i decisori politici e gli investitori su quali strategie potrebbero accelerare la creazione di un'infrastruttura sostenibile. Un'altra implementazione che potrebbe arricchire lo studio potrebbe essere l'integrazione di modelli logistici avanzati, ad esempio simulati con una modellazione ad eventi discreti. Ciò permetterebbe di valutare costi e benefici della gestione logistica delle batterie a livello magari regionale o locale, in modo più mirato e focalizzato su una piccola realtà rispetto alla macro visione che è stata approcciata in questa tesi. Modelli di questo tipo permetterebbero una simulazione dal carattere più pratico che potrebbe essere utilizzata per prendere delle decisioni a breve termine di gestione delle batterie a fine vita man mano che ne vengono prodotte nelle varie regioni o province italiane. infine, si potrebbe introdurre anche uno studio sugli impatti sociali legati alla filiera delle batterie a a fine vita, analizzando nel dettaglio l'effetto NIMBY (not in my backyard) e come risolverlo o l'effetto sul mercato del lavoro locale derivante dalla

creazione di nuovi impianti di disassemblaggio o riciclo e quali potrebbero essere quindi le conseguenze sull'occupazione, sui nuovi posti di lavoro potenzialmente disponibili e su quali competenze dovrebbero essere da essi richieste, per cominciare a svilupparle nell'ambito del territorio italiano ed insegnarle ai potenziali lavoratori in modo che possano trovarsi pronti a fronteggiare il nuovo emergente mercato.

Il presente lavoro fornisce quindi una base quantitativa utile per la pianificazione degli investimenti e per la definizione di politiche industriali nel settore del riciclo delle batterie agli ioni di litio. I risultati possono supportare decisioni strategiche a livello nazionale, contribuendo a delineare scenari realistici per la transizione verso un'economia circolare più efficiente ed efficace. Il futuro del settore dipenderà dalla capacità di anticipare le necessità di trattamento delle batterie e di sviluppare per tempo le infrastrutture adeguate, adottando un approccio lungimirante che coniughi l'obiettivo di raggiungimento di una sostenibilità ambientale con un possibile equilibrio economico che possa giovare allo stato e ad i suoi imprenditori.

A Funzioni utilizzate su AnyLogic

A.1 Delay e Delay3

Nella System Dynamics di AnyLogic, le funzioni delay e delay3 sono utilizzate per modellare ritardi nei flussi di materiale o informazione all'interno di un sistema dinamico. Queste funzioni giocano un ruolo cruciale nel rappresentare i tempi di transizione di un'entità da uno stato all'altro, con effetti diversi sul comportamento del sistema.

- **Funzione delay**: introduce un ritardo a tempo fisso, in cui una quantità di materiale o informazione che entra in un processo viene mantenuta per un periodo di tempo specificato prima di essere rilasciata. La formula generale in AnyLogic è:
$$Outflow(t) = Inflow(t - T) \tag{28}$$
dove:
  - T è il tempo di ritardo fisso;
  - Inflow(t) è il valore dell'afflusso al tempo t;
  - Outflow(t) è il valore del deflusso al tempo t.

  Le caratteristiche principali di delay sono che è **deterministico**, ovvero ogni unità del flusso viene ritardata esattamente di T, non ha **nessuna dispersione**, ovvero tutto il materiale esce dal ritardo nello stesso momento in cui è entrato più T ed è utile per rappresentare sistemi in cui il ritardo è fisso e prevedibile, come il tempo di attesa in un magazzino prima della spedizione. Per utilizzare la funzione delay utilizzare la seguente dicitura:
$$flusso = delay(equazione\, flusso,\, tempo\, di\, delay) \tag{29}$$
.

- **Funzione delay3**: introduce un ritardo distribuito di terzo ordine, utilizzando una serie di tre ritardi concatenati in serie, ognuno dei quali riceve ed elabora una parte del flusso. Questo modello è più realistico per sistemi fisici o biologici in cui il ritardo ha una distribuzione più ampia. La formula approssimativa per il deflusso è:
$$\text{outflow}(t) = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{2} \text{inflow}\left(t - \frac{iT}{3}\right) \tag{30}$$
dove il ritardo totale T è suddiviso in tre fasi uguali a $\frac{T}{3}$ e ogni fase contribuisce progressivamente al rilascio del flusso. Le caratteristiche principali di delay3 sono che è **stocastico**, ovvero le unità fluiscono con una distribuzione attorno a T, ha una **dispersione temporale**, ovvero il flusso in uscita inizia prima del tempo T e continua anche dopo ed è più **realistico** perché modella

meglio processi con variabilità naturale, come il trasporto di materiali, il flusso sanguigno o il decadimento delle batterie, nel nostro caso. È utile per simulare processi con ritardi distribuiti, come la logistica, la diffusione di informazioni o il decadimento progressivo di risorse.

Per utilizzare la funzione delay3 utilizzare la seguente dicitura:

$$flusso = delay3(equazione\, flusso,\, tempo\, di\, delay) \tag{31}$$

È importante puntualizzare che nel momento in cui nei flussi di output viene utilizzata una funzione di delay per modellare dei ritardi effettivi di uscita dallo stock sarà opportuno basare le formule utilizzate non sullo stock precedente ma sui flussi in input a tale stock. Ciò deve essere fatto per far fronte a un problema riscontrato empiricamente nell'utilizzo del software Anylogic, il quale, nel caso in cui esista la funzione di ritardo, non va a salvare in una cella di memoria a parte la quantità di stock che deve poi effettivamente far uscire dopo il ritardo, ma la mantiene semplicemente all'interno dello stock stesso fino a quando non uscirà dopo il tempo prestabilito. Questo comportamento fa sì che all'anno successivo, nel momento in cui bisognerà calcolare il valore del flusso di uscita, che sarà poi anch'esso ritardato del delay in questione, si vada a considerare la quantità in stock presente in quel momento, per imporre che esca nel momento desiderato. Il problema è che in quella quantità è presente anche quella che dovrebbe già essere stata vincolata l'anno prima ad uscire dopo il delay e quindi se il flusso di output venisse calcolato tenendo conto di quella quantità essa verrebbe conteggiata due volte nel complesso. Tramite simulazioni sperimentali su semplici modelli si è notato infatti che lo stock anno per anno utilizzando questa metodologia cominciava a diventare di valore negativo, in quanto gli si andava ad imporre che dovesse da esso uscire più di quanto fosse in realtà entrato. Il modo per risolvere questa situazione è andare ad imporre le condizioni di output dallo stock, se è presente un delay, basandosi sui flussi in ingresso allo stock stesso, in modo che il delay vada a osservare effettivamente le quantità entrate e ritardi esattamente quelle del tempo prestabilito, mentre lo stock non sarà inserito nella formula e proseguirà il suo processo di carico e scarico in maniera realistica e corretta. Nel caso i delay non siano presenti invece il problema non si pone, in quanto il modo che ha AnyLogic di aggiornare lo stock, basato sulla differenza istantanea tra output e input basato sulle derivate temporali, in quel caso agisce correttamente nelle operazioni di aggiornamento.

A.2 Investment rate disassembly function

```
1  if(time()-investment_time_disassembly >=
       total_disassembly_delay) {
2      if(disassembly_rate_gap >= 0.2) {
3          investment_time_disassembly = time();
4          investment_capacity_disassembly = (first_end_of_life -
               capacity_of_disassembly_factories);
5      }
6      else {
7          return 0;
8      }
9  }
10 else if(time() - investment_time_disassembly <= 1) {
11 return investment_capacity_disassembly;
12 }
13 return 0;
```

La funzione verifica innanzitutto che sia trascorso un intervallo di tempo sufficiente dall'ultimo investimento prima di avviare un nuovo processo di espansione della capacità di disassemblaggio. Se questa condizione è soddisfatta, viene esaminato il valore attuale del *disassembly rate gap* e confrontato con una soglia critica predefinita (in questo caso 0.2, ma modificabile in base agli scenari di simulazione). Se il valore del *disassembly rate gap* supera la soglia critica, viene pianificato un nuovo investimento. A tal fine, si aggiorna il tempo in cui è memorizzato il momento di inizio dell'ultimo investimento e si calcola l'incremento necessario della capacità di disassemblaggio, determinato dalla differenza tra il numero di batterie giunte a fine vita e la capacità attuale degli impianti di disassemblaggio. Infine, per garantire un comportamento realistico del modello, l'investimento viene vincolato a una durata di un anno. Questo periodo rappresenta il tempo necessario affinché l'investimento venga completato e il corrispondente valore rimanga nel flusso *investment rate disassembly*. Senza questa condizione, il sistema continuerebbe ad accumulare investimenti fino alla successiva decisione di espansione, impedendo al flusso di tornare a zero dopo un anno. Ciò porterebbe a un accumulo errato della capacità in costruzione nello stock *factory capacity disassembly under construction*, compromettendo l'accuratezza della simulazione.

A.3 Investment rate recycling function

```
1  if(time()-investment_time_recycling>=total_recycling_delay)
       {
2      if(recycling_rate_gap>=0.2){
3          investment_time_recycling= time();
               investment_capacity_recycling=first_end_of_life
               *(share_of_directly_recycle)*(1-share_export)+
               time_of_investment_flow-
               capacity_of_recycling_factories;
4      }
5      else{
6          return 0;
7      }
8  }
9  else if(time()-investment_time_recycling<=1){
10     return investment_capacity_recycling;
11 }
12 return 0;
```

La funzione va a controllare inizialmente che sia passato dall'ultimo investimento effettuato il tempo necessario per portarlo a termine e per poter far sì che gli impianti nuovi siano effettivamente stati realizzati. Se ciò è avvenuto prosegue a verificare che sia il caso o meno di effettuare un nuovo investimento. Controlla quindi il valore istantaneo del gap tra *recycling rate* e *recycling rate target* e nel caso il valore limite di accettabilità del gap (in questo caso posto a 0.2) sia superato va a imporre di investire. In questo caso nella funzione si può osservare il caso di supply chain integrata, in cui la quantità di capacità aggiuntiva su cui investire è calcolata sulla base dello stock *first end of life*. Se si volesse utilizzare la funzione per il caso di supply chain non integrata sarebbe necessario sostituire tale stock con *disassembly dummy*. Si impone poi che l'investimento venga effettuato nel flusso *investment rate recycling* per un solo anno, ovvero il tempo di delay destinato all'esecuzione dell'investimento stesso. Così facendo il flusso dopo un anno si svuoterà fino all'investimento successivo, in modo che il modello rimanga aderente alla realtà.

B I modelli di ottimizzazione lineare

Un modello di ottimizzazione lineare è un modello matematico utilizzato per determinare la soluzione ottimale di un problema decisionale in cui sia la funzione obiettivo che i vincoli sono espressi in forma lineare. Questo tipo di modello trova applicazione in numerosi ambiti, tra cui la logistica, la gestione della produzione, la pianificazione finanziaria e l'allocazione delle risorse. Un modello di programmazione lineare è generalmente definito dalla seguente struttura:

- **variabili decisionali**: rappresentano le quantità da determinare, come il numero di unità da produrre, la quantità di materiale da trasportare o il livello di investimento in un determinato settore;
- **funzione obiettivo**: è una funzione lineare che esprime il criterio da massimizzare o minimizzare, ad esempio il profitto da massimizzare o i costi da minimizzare. Ha la forma generale:

$$\max \text{ o } \min \quad Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n \tag{32}$$

  dove x_i sono le variabili decisionali e c_i sono i coefficienti associati a ciascuna variabile;
- **vincoli**: rappresentano le restrizioni che devono essere rispettate nel problema, come la disponibilità limitata di risorse o i limiti sulla produzione. Sono espressi come equazioni o disequazioni lineari della forma:

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n \leq b \tag{33}$$

  dove a_i sono i coefficienti dei vincoli e b è un valore massimo o minimo imposto dal problema;
- **condizioni di non negatività**: spesso le variabili decisionali devono assumere solo valori non negativi, poiché rappresentano quantità fisiche, come il numero di prodotti o la quantità di risorse allocate:

$$x_i \geq 0, \quad \forall i \tag{34}$$

I problemi di ottimizzazione lineare possono essere risolti mediante algoritmi specifici, tra cui:

- **metodo del simplesso**: un algoritmo iterativo che esplora i vertici della regione ammissibile per trovare la soluzione ottimale;
- **metodo dei punti interni**: una tecnica che consente di trovare la soluzione muovendosi all'interno della regione ammissibile, piuttosto che lungo i suoi confini;

- **programmazione lineare intera**: una variante in cui le variabili devono assumere valori interi, utilizzata in problemi di assegnazione, scheduling e ottimizzazione della supply chain.

I modelli di ottimizzazione lineare sono ampiamente utilizzati in diversi settori, tra cui:

- **logistica e trasporti**: ottimizzazione delle rotte di consegna e distribuzione;
- **gestione della produzione**: massimizzazione della produzione minimizzando i costi di risorse e manodopera;
- **energia e sostenibilità**: pianificazione dell'uso efficiente delle risorse energetiche e riduzione delle emissioni;
- **economia e finanza**: allocazione ottimale di investimenti e gestione di portafogli finanziari.

Riferimenti bibliografici

Agency International Energy. Global EV Outlook 2022. 2022.

Al-Alawi M. K., Cugley J., Hassanin H. Techno-economic feasibility of retired electric-vehicle batteries repurpose/reuse in second-life applications: A systematic review // Energy and Climate Change. 2022. 3. 100049.

Amnesty International . "This is what We Die For": Human Rights Abuses in the Democratic Republic of the Congo Power the Global Trade in Cobalt. 2016.

BFS , Astra . Strassenfahrzeuge – neue Inverkehrsetzungen. 2023.

Bank World. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. 2022.

Bhanu Pratap, Mohan T. V. Krishna, Amit R. K., Shankar Venugopal. Factors Affecting the Market Dynamics of Lithium-Ion Battery for Electric Mobility: A System Dynamics Perspective // Journal of Simulation. 2024. 18, 2. 123–137.

Bianchetti Roberto, Althaus Hans-Jörg, Cox Brian, Truniger Lucas, Meyer Irina, Marmy Charles, Büchel Andrin, Gasser Martin, Hischier Roland, Wäger Patrick. Batterien für Elektrofahrzeuge. April 2023.

European Parliament and Council of the European Union . Regulation (EU) 2023/1542 on batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC. 2023.

Gailani Ahmed, Mokidm Rehab, El-Dalahmeh Mo'ath, El-Dalahmeh Ma'd, Al-Greer Maher. Analysis of Lithium-ion Battery Cells Degradation Based on Different Manufacturers // 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). 2020. 1–6.

Gao Jiayang, Xu Xianglong, Zhang Tao. Forecasting the development of Clean Energy Vehicles in Large Cities: A System Dynamics Perspective // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2024. 163. 377–393.

Harper Gavin, Sommerville Roberto, Kendrick Emma, Driscoll Laura, Slater Peter, Stolkin Rustam, Walton Allan, Christensen Paul, Heidrich Oliver, Lambert Simon, Abbott Andrew, Ryder Karl, Gaines Linda, Anderson Paul. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles // Nature. 2019. 575, 7781. 75–86.

Kamath Dipti, Moore Sharlissa, Arsenault Renata, Anctil Annick. A system dynamics model for end-of-life management of electric vehicle batteries in the US: Comparing the cost, carbon, and material requirements of remanufacturing and recycling // Resources, Conservation and Recycling. 2023. 196. 107061.

Motus-E Politecnico di Milano PwC Strategy. Il riciclo delle batterie dei veicoli elettrici @2050: scenari evolutivi e tecnologie abilitanti. Marzo 2023.

Neumann T., Rothermel S., Hanisch C., Haselrieder W., Kwade A. Recycling lithium-ion batteries: Challenges and opportunities // Resources, Conservation and Recycling. 2022. 175. 105929.

Nurdiawati Anissa, Agrawal Tarun Kumar. Creating a circular EV battery value chain: End-of-life strategies and future perspective // Resources, Conservation and Recycling. 2022. 185. 106484.

Ojha Ravindra, Agarwal Alpana. Implications of Circular Production and Consumption of Electric Vehicle Batteries on Resource Sustainability: A System Dynamics Perspective // Environment, Development and Sustainability. 2024. 26. 12345–12360.

Olivetti Elsa A., Ceder Gerbrand, Gaustad Gabrielle G., Fu Xinkai. Lithium-ion battery supply chain considerations: Analysis of potential bottlenecks in critical metals // Joule. 2017. 1, 2. 229–243.

Pratap Bhanu, Mohan T. V. Krishna, Amit R. K., Venugopal Shankar. Evaluating Circular Economy Strategies for Raw Material Recovery from End-of-Life Lithium-Ion Batteries: A System Dynamics Model // Sustainable Production and Consumption. 2024. 30. 456–470.

Prognos , Energy TEP, Infras , Ecoplan . Energieperspektiven 2050+ Szenarienergebnisse. 2021.

Rosenberg Sonja, Glöser-Chahoud Simon, Huster Sandra, Schultmann Frank. A dynamic network design model with capacity expansions for EoL traction battery recycling – A case study of an OEM in Germany // Waste Management. 2023. 160. 12–22.

Schilling Melissa A. Gestione dell'Innovazione. Milano: McGraw-Hill Education, 2020.

Seika Juliane, Kubli Merla. Repurpose or recycle? Simulating end-of-life scenarios for electric vehicle batteries under the EU battery regulation // Sustainable Production and Consumption. 2024. 51. 644–656.

Shaikh Waleed Ahmed, Kalwar Muhammad Ahmed, Khan Muhammad Ali, Wassan Asif Nawaz, Wadh Muzamil Hussain, Shahzad Muhammad Faisal. A System Dynamics Costing Model for The Refurbishment of Electric Vehicle Batteries // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 2023. 17, 1. 1–10.

Sterman John D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. New York: McGraw-Hill, 2000.

Yang Jian, Mu Dong, Li Xin. A System Dynamics Analysis About the Recycling and Reuse of New Energy Vehicle Power Batteries: An Insight of Closed-Loop Supply Chain // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. 546. 042020.